

The
Quark
and the Jaguar

夸克与美洲豹

——简单性和复杂性的
奇遇

第一推动丛书

第二辑

【美】M·盖尔曼 / 著
杨建邺 李湘莲等译

 湖南科学技术出版社
Hunan Science & Technology Press

第一推动丛书 第二辑

“人类知识通常各自严密封锁着，但这本书横贯了几乎所有的科学，让人兴奋、刺激。了解第一流学者如何认识、掌握最伟大的秘密，永远是一件极愉快的事情。这些一流的学者在探索自然奥秘时，总是坚决反对神秘主义。”

——卡尔·萨根(Carl Sagan)

康奈尔大学教授，《宇宙》的作者

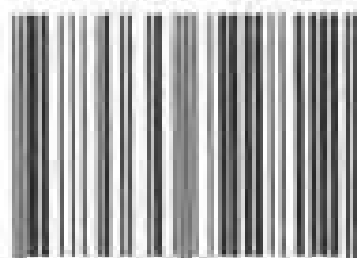
“对我来说，奇诡和玄奥的正是大自然中我称之为简单和复杂两个方面。奇诡是物理定律中的一个符号，一旦摆出来，在人类并未充分分析之前，就完全接受了它；玄奥的也是如此。虽然在沸水丛中人们可以闻到它那刺鼻的气味，但它也只是一个不可捉摸的复杂反应系统的一个简便的暗喻，它同样没有经过仔细的分析。”

——盖尔·加姆(Gary Gamm)



第一推动丛书

ISBN 7-5357-2281-4



9 787535 722812 >

N·42 定价:21.60 元

责任编辑 李永平 吴炜
装帧设计 刘苏斌

■【美】M·盖尔曼著 ■杨建邺 李湘莲等译 ■湖南科学技术出版社

夸克与美洲豹



——简单性和复杂性的奇遇

●《第一推动丛书》第二辑 ●《第一推动丛书》第二辑 ●

The Quark and the Jaguar

©本书通过美国 Brockman 公司授权湖南科学技术出版社在
中国大陆独家出版发行。

©1994 by Murray Gell - Mann. Chinese translation copyright by:
Published by arrangement with in association with Brockman, Inc.

ALL RIGHTS RESERVED

本书根据 W.H. Freeman and Company 1994 年版本译出

ISBN: 7—5357—2281—4/N·42

著作权合同登记 图字: 18—97—0006 号

《第一推动丛书》第二辑

夸克与美洲豹

——简单性和复杂性的奇遇

著 者: [美] M. 盖尔曼

译 者: 杨建邺 李湘莲等

责任编辑: 李永平 吴 炜

出版发行: 湖南科学技术出版社

[http://www. hnustp. com](http://www.hnustp.com)

社 址: 长沙市湘雅路 280 号

邮购联系: 本社直销科 0731 - 4375808

印 刷: 株洲冶金印刷厂

地 址: 株洲市大坪路 18 号

邮 编: 412000

(印装质量问题请直接与本厂联系)

经 销: 湖南省新华书店

出版日期: 2002 年 1 月

开 本: 850mm × 1168mm 1/32

印 张: 13

插 页: 4

字 数: 310000

书 号: ISBN7 - 5357 - 2281 - 4/N·42

定 价: 21.60 元

(版权所有·翻印必究)

第 一 推 动 从 书 第 二 卷

这是一本与作者一样十分有趣的书,他把那些看起来似乎完全不相关的东西,如黑猩猩的行为、雪崩力学、超弦理论以及莎士比亚等等,都编织到一个迷人的故事当中,真是奇妙极了!

— — 曹兴诗译 — —

作者简介

M·盖尔曼 (Murray Gell-Mann)

美国天才物理学家,夸克的发现者。他因对“基本粒子分类及其相互作用方面的贡献和发现”而荣获 1969 年诺贝尔物理学奖。

作者简介

杨建邺

湖北省红安县人,1935年出生,1956年毕业于武汉市15中,1961年毕业于兰州大学物理系,现任华中理工大学物理系教授。

作者简介

李湘莲

湖南省双峰县人,1969年出生,1992年毕业于国防科技大学物理系,1995年获华中理工大学硕士学位。现在华中理工大学物理系工作。

The
Quark
and
the
Jaguar

第一推动丛书 第二辑

【美】M·盖尔曼 著
杨建邺 李湘莲等译

夸克
与美洲豹
——简单性和复杂性的
奇遇



湖南科学技术出版社
Hunan Science & Technology Press

总 序

科学，特别是自然科学，最重要的目标之一，就是追寻科学本身的原动力，或曰追寻其第一推动。同时，科学的这种追求精神本身，又成为社会发展和人类进步的一种最基本的推动。

科学总是寻求发现和了解客观世界的新现象，研究和掌握新规律，总是在不懈地追求真理。科学是认真的、严谨的、实事求是的，同时，科学又是创造的。科学的最基本态度之一就是疑问，科学的最基本精神之一就是批判。

的确，科学活动，特别是自然科学活动，比较起其他的人类活动来，其最基本特征就是不断进步。哪怕在其他方面倒退的时候，科学却总是进步着，即使是缓慢

而艰难地进步，这表明，自然科学活动中包含着人类的最进步因素。

正是在这个意义上，科学堪称为人类进步的“第一推动”。

科学教育，特别是自然科学的教育，是提高人们素质的重要因素，是现代教育的一个核心。科学教育不仅使人获得生活和工作所需的知识和技能，更重要的是使人获得科学思想、科学精神、科学态度以及科学方法的熏陶和培养，使人获得非生物本能的智慧，获得非与生俱来的灵魂。可以这样说，没有科学的“教育”，只是培养信仰，而不是教育。没有受过科学教育的人，只能称为受过训练，而非受过教育。

正是在这个意义上，科学堪称为使人进化为现代人的“第一推动”。

近百年来，无数仁人智士意识到，强国富民再造中国离不开科学技术，他们为摆脱愚昧与无知作了艰苦卓绝的奋斗，中国的科学先贤们代代相传，不遗余力地为中国的进步献身于科学启蒙运动，以图完成国人的强国梦。然而应该说，这个目标远未达到。今日的中国需要新的科学启蒙，需要现代科学教育。只有全社会的人具备较高的科学素质，以科学的精神和思想、科学的态度和方法作为探讨和解决各类问题的共同基础和出发点，社会才能更好地向前发展和进步。因此，中国的进步离不开科学，是毋庸置疑的。

正是在这个意义上，似乎可以说，科学已被公认是

中国进步所必不可少的推动。

然而，这并不意味着，科学的精神也同样地被公认和接受。虽然，科学已渗透到社会的各个领域和层面，科学的价值和地位也更高了，但是，毋庸讳言，在一定的范围内，或某些特定时候，人们只是承认“科学是有用的”，只停留在对科学所带来的后果的接受和承认，而不是对科学的原动力，科学的精神的接受和承认。此种现象的存在也是不能忽视的。

科学的精神之一，是它自身就是自身的“第一推动”。也就是说，科学活动在原则上是不隶属于服务于神学的，不隶属于服务于儒学的，科学活动在原则上也不隶属于服务于任何哲学。科学是超越宗教差别的，超越民族差别的，超越党派差别的，超越文化的地域差别的，科学是普适的、独立的，它自身就是自身的主宰。

湖南科学技术出版社精选了一批关于科学思想和科学精神的世界名著，请有关学者译成中文出版，其目的就是传播科学的精神，科学的思想，特别是自然科学的精神和思想，从而起到倡导科学精神，推动科技发展，对全民进行新的科学启蒙和科学教育的作用，为中国的进步作一点推动。丛书定名为《第一推动》，当然并非说其中每一册都是第一推动，但是可以肯定，蕴含在每一册中的科学的内容、观点、思想和精神，都会使你或多或少地更接近第一推动，或多或少地发现，自身如何成为自身的主宰。

《第一推动》丛书编委会

前 言

《夸克与美洲豹》不是一本自传，但它包含了我童年的一些回忆和不少关于我同事的轶事趣闻；这本书主要讨论的也不是我在夸克方面的工作，但它有不少地方谈到了物理学的一些基本定律，包括夸克的行为。我希望我真有那么一天写一本科学自传，但这本书的目的是向读者对正在边缘科学中出现的一种综合趋势提出我个人的一些观点，这和综合趋势在我们研究周围世界的简单性和复杂性时经常出现。研究已经表明，物理学、生物学、行为科学，甚至艺术和人类学，都可以用一种新的途径将它们联系到一起。有些事实和想法初看起来彼此风马牛不相关，但新的方法却很容易使它们发生关联。我们（无论是否在研究科学）常常问自己：简单性和复杂性究竟意味什么？现在连这个恼人的问题也开始

可以作出回答。

本书分成四篇。在第一篇的开始，我描述了导致我写这本书的一些个人经历。有一次我在热带森林里作长途旅行，我想研究鸟，计划作些保护大自然的活动，突然我意识到物理学的基本定律与我们周围的世界有着许多关联，我为这种想法激动起来，并想让读者同我分享这些激动。我一生都喜欢研究有生命的东西，但我的职业却使我专心致志地研究一些基本定律。这些基本定律是所有科学的基础（本书将作某些讨论），但它们却似乎经常远离大部分经验，包括许多其他学科的经验。反映在简单性和复杂性方面，我们常常觉察到有些关联可以帮助我们把所有从简单到复杂的现象连接到一起。

亚瑟·斯策（Arthur Sze）有一首诗提到夸克和美洲豹，当我妻子把这首诗念给我听时，我立即意识到这两个意象正好适合我想说明的主题。夸克是所有物质最基本的基石，所有物体都是由夸克和电子组成，只不过数目有多有少。即使是美洲豹这种古已有之的力量和凶猛的象征，也还是一大堆夸克和电子。不过这一堆夸克和电子真令人惊诧！由于几十亿年的生物进化，美洲豹显示出惊人的复杂性。那么，在这儿复杂性到底精确地意味着什么呢？它是如何产生的呢？类似这样的一些问题，正是本书试图回答的。

第一篇的其余部分介绍简单性和复杂性里各种概念之间的关系，以及复杂的适应系统（如有生命系统的学习和进化）。一个孩子学习语言，细菌发展它对抗生素的抗药性以及人类科学事业等等，都是复杂适应系统讨论的例子。我还讨论了科学中理论的作用、科学是否比

其他事物更为基础，以及还原论对相关问题的看法。

第二篇介绍了大至宇宙、小至组成宇宙中万事万物的基本粒子都要遵循的一些基本定律。夸克在这儿露面了，接着介绍超弦理论。超弦理论在科学史上首次为自然界所有的粒子和力提供了一个很有希望的统一理论。基本粒子理论太抽象了，即使像本书那样作了解释和不用数学公式，很多读者依然会感到很难懂。有些读者如果愿意的话，可以不看第二篇，特别是第十一章（量子力学的现代诠释）和第十三章（基本粒子——包括夸克——的标准模型）。避开这两章或整个这一篇，对后面其余部分不会造成严重影响。我没有想到的是，这本书有一部分本来想试图解释物理学的基本理论为什么简单，但对许多读者来说竟十分困难。这得怪我！本书第二篇有一章介绍时间之箭，在这一章的结尾处，对无论是像生物进化这样的复杂适应系统，或者像银河系这样的非适应系统，何以出现越来越复杂的结构作了评论。

第三篇接着讨论在复杂适应系统，特别是在生物进化、人类创造性思想、批判的和迷信的思想和人类社会行为的某些方面中出现的选择压力（selection pressures），对适应性和适应性前景展望作了大致而适度的介绍。在第二十章，我简要地描述了计算机作为复杂适应系统的用处，例如发展游戏的策略或对自然的复杂适应系统提供简化的模拟。

最后一篇和其他几篇相比较有很大的不同，主要涉及的是政治内容，而不是科学；还提到一些主张，当然这也可视为学术。第二十一章，我对本书前面谈到的一

个问题，即地球上生命的多样性代表了近 40 亿年生物进化的信息精华，作了进一步讨论；我还指出人类文化的多样性同样说明文化进化经历了几万年。在这一章，我坚持认为努力维护生物和文化的多样性是十分必要的，为此我讨论了其中所涉及的一些问题、悖论和挑战。但这些论述实际上不可能单独、孤立地考虑。今天，连接人类种族之间和人类与生物圈之间的关系是如此之复杂，以至各个方面都会彼此紧密影响。我们必须对整个系统进行研究，即使这种研究很粗糙也是必要的，因为对复杂的非线性系统的各个部分不作紧密联系的研究，我们对整体行为就不会有正确的思想。第二十二章我力图用这种不太严密的整体方法，研究了当今世界上的一些问题，其中不仅包括环境、人口统计和经济学方面的问题，还包括社会、政治、军事、外交和意识形态方面的问题。研究这些问题不仅仅是对未来进行思考，而且想在人类和人类以外的生物圈的多种可能的未来之路之中，寻求一条合理的可能道路，使我们的世界能更好地维持下去。我这儿所说的“持续性”（sustainability）具有较广泛的意义，不仅指避免巨大的环境的灾难，也指避免灾难性的战争，广泛而持续的暴行以及其他邪恶。

读者在这本书里将会发现，我常常提到圣菲研究所（Santa Fe Institute, SFI）。我曾帮助建立这个研究所，如今退休之后，我还在这个研究所工作。在此之前，我在加州理工学院工作了 30 多年，退休后我成了该校荣誉教授。现在我所从事的简单性、复杂性和复杂适应系统的许多研究，就是与这个研究所的成员一起完成的。

这个研究所是一个相当松散的组织，有点像一个家庭。所长是克奈普 (Edward Knapp)，还有两个副所长协助他工作，再就是 12 位非常勤恳的工作人员。只有 3 个任期为 5 年的教授，我是其中之一，其他的人都是访问学者。访问学者来自世界各地，他们在研究所停留的时间有的只一天，有的逗留一年，其中有些人经常来访。研究所经常举办各种专题学术讨论会，会期有的只一天，有的则为一至二周。除此以外，一些研究组织还举行各类两种以上学科专题研究。分布极广的组织成员们彼此用电话、电子邮件、电传相互联络，偶而也用信联络，还不时在圣菲或其他什么地方相会。他们分别是各个专业领域的专家，但他们都对跨专业边界的合作极感兴趣。他们每一个人都各自属于一个专门研究机构，在那儿他们的研究都得心应手，但他们又都十分珍视与圣菲的亲密关系，在圣菲允许他们作一些跨学科连接的研究，但在他们的研究所里却不容易进行。这些研究所有些还是很大的工业研究实验室、大学或国家实验室 (特别是洛斯阿拉莫斯，它为 SFI 提供了许许多多聪慧而又勤恳工作的成员)。

这些研究复杂适应系统的人开始想发现所有这些系统里存在的一些普遍原理，为此就必须同许多领域的专家进行精深的讨论和合作。当然，认真和不懈地研究各种专门学科仍然是必不可少的，但各种专门学科的综合也是亟需的。一些学者和科学家从他们自己研究的专业领域转变为学习简单性和复杂性 (或者一般称之为复杂适应系统) 的学生，并作出了许多重要贡献。

这种转变的成功，常常和某种思维风格有关。尼采

把思维风格分为两类：一是“日神”（Apollonians），这种风格擅长逻辑、分析，考虑问题比较冷静；另一是“酒神”（Dionysians），这种风格更习惯于直觉、综合和情绪激动。有时很粗浅地用这两种特性区分左脑和右脑的用途。但我们当中的某些人似乎属于另外一种，即“奥德赛”（Odysseans）型风格。具有这种风格的人在需要将各种思想连接起来时，可以将日神和酒神风格联合使用。这种人在传统的研究所里常常感到孤独，但在SFI却可以找到如鱼得水的环境。

在SFI有各种各样的专业知识出现，如数学、计算机科学、物理学、化学、群体生物学、生态学、进化生物学、发展生物学、免疫学、考古学、语言学、政治科学、经济学和历史学。SFI举办的学术讨论会和发表的研究报告，内容广泛，包括爱滋病的流行和传播；美国西南部发现大规模史前废弃村落；反对殖民地的掠夺政策；钞票的印制是否可以利用金融市场价格涨落的非随意的一些方面；当一种重要的物种迁走后生态共同体会发生什么情况；怎么为计算机编制模拟生物进化的程序以及量子力学如何引向我们周围熟悉的世界，等等。

在第二十二章我还描述了SFI甚至试图与其他组织合作，对我们行星的人类社会如何与自身和生物圈其他生物相互作用，以发展成更适合生存的模式进行了设计。这儿我要特别指出的，我们必须克服在学术界和官方中间非常流行的一种思想，即认为只有那些已详细研究了的专业学科才值得人们去干。在那些我称之为“在整体上只作了粗疏一瞥”的领域里，有些人敢于进入，并作出重大贡献，这非常值得我们庆贺。

虽然 SFI 是世界上几个极少数从事跨领域简单性和复杂性研究的研究中心之一，但这绝不意味只有 SFI 对此作出了重要贡献，也不意味 SFI 是这种研究的主要处所。SFI 里许多个人的研究计划与世界其他学者的相似，而且在很多情形下，其他研究所的有关研究比 SFI 早，甚至有许多研究计划在 SFI 于 1984 年建立以前就提出来了。在某些情形下，这些研究所是 SFI 家庭关键成员的“本垒”。

我应该请求大家原谅，因为我好像在为 SFI 吹嘘，特别是近几年某些出版物的误传，使 SFI 和其他研究和教学组织间的关系受到损害之时，更容易引起这种误会。有许多对 SFI 的赞扬伤害了其他团体，这使得这些团体的同事们，尤其是欧洲的同事们，十分恼怒。如果我的这本书也引起这种误会，我感到很抱歉。我强调 SFI 的原因，仅仅是因为我熟悉 SFI 进行的研究，而不太熟悉其他研究部门的研究，即使这些研究也许进行得更早。

我还应该指出，研究简单性、复杂性和复杂适应系统有关课题的少数几个领头的研究所，他们卓有成效的研究还正在继续，而且大多持续了好多年。我把这些研究机构列在下面，虽然我的排列是随意的，但我很可能会激怒那些没有列入的研究机构的一些科学家和学者。这些研究机构是：

巴黎高等师范学校；哥丁根普朗克生物物理化学研究所，所长是艾根（Manfred Eigen）；维也纳理论化学研究所，所长是舒斯特（Peter Schuster，他现在正忙于在耶拿建立一个新的研究所）；密执安大学，伯克

(Arthur Burk)、艾克色诺德 (Robert Axelrod)、科恩 (Michael Cohen) 和霍兰德 (John Holland), 在这所大学里组成了一个“BACH 小组”, 这个小组长期以来就讨论有关复杂系统的问题, 他们所有的人, 特别是霍兰德 (他和我是科学委员会的主席), 与 SFI 都有某种程度的联系; 斯图加特大学, 哈肯 (Hermann Haken) 和他的助手们在这所大学里长期研究物理学中的复杂系统, 他们把他们研究的内容称为“协同学” (synergetics); 布鲁塞尔的自由大学, 这所大学里一些有趣的研究已经进行了好多年; 荷兰的乌特勒支大学; 日本东京大学纯科学和应用科学系; 日本京都附近的 ATR, 这儿有从美国特拉华大学去的雷 (Thomas Ray); 美国加利福尼亚大学 (包括圣克鲁斯、伯克利和戴维斯分校) 几个校园里的非线性研究中心; 美国阿利桑那大学; 美国厄巴拉的伊利诺斯大学贝克研究所 (Beck Institute); 美国加州理工学院贝克研究所的计算和神经系统规划组; 瑞典查尔默斯大学; 丹麦哥本哈根的 NORDITA; 奥地利维也纳国际应用系统分析研究所; 意大利图林科学交换学院 (Institute for Scientific Interchange)。

有几位我十分尊敬的朋友和同事, 他们在我写作的不同阶段校阅了全部手稿, 这使我感到万分的荣幸。我非常感谢他们极有价值的帮助, 但由于时间的关系, 他们精妙的建议我只采纳了其中的一部分。这些人包括贝纳特 (Charles Bennett)、凯斯蒂 (John Casti)、约翰逊 (George Johnson)、李普金 (Rick Lipkin)、罗伊德 (Seth Lloyd)、麦克卡希 (Cormac McCarthy)、莫洛惠兹 (Harold Morowitz) 和萨根 (Carl Sagan)。另外, 有许多在

不同领域里的著名专家，他们慷慨地花费时间与我就手稿中特定的部分进行了商榷，这些专家是：亚瑟（Brian Arthur）、布朗（James Brown）、克鲁奇菲尔德（James Crutchfield）、费尔德曼（Marcus Feldman）、费兹帕特里克（John Fitzpatrick）、吉尔伯特（Walter Gilbert）、哈特尔（James Hartle）、克茨芬克（Joseph Kirschvink）、兰顿（Christopher Langton）、曼德布罗（Benoit Mandelbrot）、芒恩第三（C. A. Munn III）、雷（Thomas Ray）、肖普夫（J. W. Schopf）、施瓦兹（John Schwarz）和谢帕德（Roger Shepard）。当然，书中仍然会出现一些错误，这些错误都由我个人负责，与上面提到的这些厚道而有学识的人没有任何关系。

任何熟悉我的人都知道我对于错误不能容忍，一个明显的例子是我经常订正饭店菜单上法文、意大利文或西班牙文的词汇。当我偶然发现某人写的一本书上有不精确的地方，我就会十分沮丧，不知道能否从这位作者那儿学习到什么东西，因为这位作者已被证明至少在某一点上出现了错误；当错误涉及到我或我的著作，我会怒不可遏。因为这本书的读者马上会想像得到我会多么痛苦，我会认为我的朋友和同事将指出成打的错误，无论他们感到开心还是抱歉，作为至善主义的我，这种难堪是无法忍受的。福克斯（Robert Fox，写过人类人口问题的书）曾向我描述一位传奇的人物：一位挪威照管灯塔的人由于冬天的长夜无事可干，就专门在书中寻找错误。我常常会想到这位传奇人物在读我的书。

我应该特别感谢我的忠实能干的助手狄安娜·兰姆斯（Diane Lams），她把我的许多事务管理得有条不紊，

使我能把全部时间和全副精力投身于写作计划之中，没有她的帮助我完成写作任务是很困难的，特别是当时间紧迫时我的坏脾气不时发作，但她都忍受下来了。

弗里曼出版公司非常明白我在编制目录时遇到的困难，他们让莱昂（Jerry Lyons）这位了不起的编辑来帮助我（他现在在 Springer 出版社工作），与他一起工作我就轻松愉快多了。我不仅感谢他的发奋工作，而且欣赏他的幽默和和蔼可亲，并怀念我与玛希娅（Marcia）同他及他那位贤淑的妻露西（Lucky）一起度过的美好时光。我还应该感谢莎娜（Sara Yoo），她不知劳累地处理那数不清的原稿、修订稿，还得对付世界各地的编辑。吉普森（Liesl Gibson）也是我应该感谢的一位助手，她有效而卓越的工作一直持续到交稿前最后一分钟。

在我写这本书的时候，加州理工学院、SFI、阿斯彭物理中心（Aspen Center of Physics）和洛斯阿拉莫斯国家实验室，给予我通力合作，我应表示我的谢意。我还应该感谢 A.P.Sloan 基金和美国政府的一些机构如能源部、空军科学研究处，在我最近几年的研究中，给予了许多支持（少数读者或许会奇怪，这两个机构能给与武器研究没有关系的纯科学予以帮助，实在是由于它们具有远见）。爱普斯坦（Jeffrey Epstein）通过给 SFI 赠款的形式给我以帮助，我也应表示感谢。

在洛斯阿拉莫斯，实验室主任赫克尔（Sig Hecker）、理论部主任斯兰斯基和理论部秘书威尔兹（Stevie Wilds），给予了我特殊款待。在 SFI，每一位部门和办公室的成员，都给予我很多帮助。在加州理工学院，校长、教务长以及物理、数学、天文部历届主任都

对我十分关心，例如施瓦兹和海伦（Helen Tuck，这位非常能干的秘书在基本粒子理论组工作了20多年）。在阿斯彭物理中心，因为它的基金已有30多年历史，所以几乎每一件事都会麻烦萨莉（Sally Mencimer），我应该感谢她对我非凡的耐心。

我写作从来就感到不轻松，这也许是因为当我还是小孩时，我父亲总是对我写的任何东西给予严厉的批评。我能最终完成这个写作计划，与我亲爱的妻子玛希娅的鼓励有关，她经常设法激励我，使我不中断写作。她给予的帮助有一些是不可或缺的。她是一位诗人和英语教授，她可以帮助我去掉一个作家的一些很坏的习惯。尽管有许多坏习惯还不幸地没有改掉，但那显然不能责备她。她劝我用计算机写作，现在我完全离不开计算机了。我现在甚至有些奇怪，我以前怎么会认为没有计算机也可以写作。另外，像一些喜欢科学或数学但只学了一点点这方面知识的人一样，她是嘲笑我写的这本书最理想的人。

作为一名教师和讲演者，常有人劝告我应该在听众中找一个人与他个别地直接交谈，甚至可以与他（或她）建立经常的联系，听取他（或她）的意见。在某种意义上说，我在本书写作过程中就是这样干的。玛希娅成了这个角色。她不断地指出有些地方解释得不充分，有些地方讲得太抽象。我只好一次又一次地修改，直到她懂了和同意为止。如在许多情形下一样，她的帮助大部分十分有益。但她认为还有许多地方应该写得更明白才好。

当我在限定时间内结束本书写作时，我明白我一生

从没有像这样发奋工作过。理论物理的研究与写书完全不同。当然，一个理论工作者偶而会有意识或无意识地产生很多想法和焦虑，但他们只需要每天或少数几天的几个小时思考或计算，加上与同事们和学生们进行一些争论，一般就可以解决问题，而且工作方式简单明快——在桌上或黑板上花点时间。写书则是另外一回事，它几乎每天要把大量时间用在键盘上。对像我这样一个可以算作懒散的人，简直可以说是一个冲击。

在写这本书时最让我激动的是，这个写作计划本身就使我一再认识到，它是一个复杂适应系统。写作的每一阶段我都得有一个思想模型（或图式），一个如何进行下去的简明提要。这个提要要从大量细节突出生动的形象，这样才能写出一章或一篇。然后，经过我的编辑、朋友、同事、玛希娅和我逐页审阅每一章，最终的评论和批评不仅会影响到那一章的内容，而且会影响我的思想模型，经常有不同的模型代替了原来的模型。当新的模型需要用细节充实、成型的时候，以上过程又得重复。在这种时候，整个写作、研究工作都会受到牵动。

这种进化发展的结果，就是你正准备读的这本书。我们从事研究夸克和美洲豹以及人类关系连接链的人，都经历过一种震撼人心的激动，我希望这本书能将这种激动传递给读者。

目 录

前 言	(1)
第一篇 简单与复杂	
第一章 序言：丛林中的偶遇	(3)
第二章 早期的思想	(11)
第三章 信息和原始复杂性	(23)
第四章 随机性	(42)
第五章 儿童学习语言	(50)
第六章 细菌产生耐药性	(62)
第七章 科学活动	(74)
第八章 理论的威力	(88)
第九章 什么是基本？	(107)
第二篇 量子宇宙	
第十章 量子宇宙中的简单性和随机性	(123)
第十一章 量子力学的当代观(量子力学和经典近似)	
.....	(135)

第十二章	量子力学和傻话·····	(165)
第十三章	夸克和其他：标准模型·····	(174)
第十四章	超弦理论：终于统一了？·····	(195)
第十五章	时间之箭——向前和向后的时间·····	(210)
第三篇 选择和适应		
第十六章	生物进化及其他领域中的选择的作用·····	(229)
第十七章	从学习到创造性思想·····	(255)
第十八章	迷信和怀疑论·····	(269)
第十九章	适应和不适应的图式·····	(287)
第二十章	学习或模拟学习的机器·····	(302)
第四篇 多样性与持续性		
第二十一章	多样性濒临危险·····	(325)
第二十二章	向一个更加持续的世界转变·····	(340)
第二十三章	后记·····	(362)
译后记·····		(371)
索 引·····		(375)

第一篇

简单与复杂

第一章 序言：丛林中的偶遇

我从未在荒郊野外真正地见过美洲豹。无论是穿越热带美洲的森林，还是乘船在中、南美洲的河流上旅游，我都从来没有体验过面对凶悍的花斑豹时那种心跳遽停的感觉。好几个朋友都曾告诉我，同美洲豹相遇会改变一个人的世界观。

1985年在亚马逊河的支流那坡河附近、厄瓜多尔东部的低地雨林，是我离美洲豹最近的一次。那个地方定居着许多印第安人，他们在森林里开垦出了一片片的土地，用来种植农作物。他们说库丘亚（Quechua）语，这曾经是印加帝国的官方语言。他们还用自己的名字给亚马逊河边一些风景地命名。

从飞机上俯瞰这块从北向南，从东向西均绵延数千英里的土地，你会看到河流像一条条蜿蜒曲折的缎带镶嵌在森林之中。像密西西比河一样，这些河流常常呈U形弯曲，这些U形弯曲所环绕的区域往往被河水浸没而形成湖，每个湖通过一条闪闪发光的溪流与主河流相通。当地操西班牙语的人们称这种湖为“科恰”（cocha），科恰是库丘亚语中的一个词，它既可以指湖，又

可以指海。空中观察者在河流的不同部分都可以看到这些科恰，先是普通的河弯，然后是 U 形弯曲，接着是新形成的科恰，继之而来的是“生态过程”（ecological succession）。这时湖水慢慢地干涸，通过各种植物的作用而重新回复为森林。最终，从空中看来它就成了深绿色的森林背景中的一个浅绿色点。一个世纪或更长的时间之后，那个点将与雨林的其余部分融为一体而无法分辨。

一次，当我在潘那科恰（Pa na Cocha）附近的一条小道上散步时，我终于得以有机会近观美洲豹。潘那科恰的意思是“锯齿鲑湖”。我和几个伙伴在湖里抓到过三种不同的锯齿鲑，并将它们煮着吃了，味道非常好。那些鱼并不像人们想像的那么凶险。的确，它们有时候会袭击人，在湖水中洗澡的人一旦被咬，应立即离开水域上岸，否则伤口流出的血会引来更多的锯齿鲑。然而，在人与锯齿鲑的斗争中，更多的是锯齿鲑被人吃掉而非人被锯齿鲑吃掉。

在湖边步行一个小时左右，我们惊散了一群西猫（一种野猪，译注）。之后不久，我们又感觉到前面不远处有一头大的哺乳动物。我们嗅到了一股刺鼻的臭味，这气味与野猪气味明显不同。我们还听到大动物穿越矮树丛时踩断灌木的噼啪声。我看见了美洲豹的尾巴尖，可倏忽之间它就消失了。具有牧师和统治者权力之象征的动物之王，就这样与我们失之交臂了。

不过，使我的心灵产生震动的并非美洲豹，而是另外一种小一些的丛林猫科动物。它使我意识到，我那众多的、表面看来毫不相干的兴趣其实是统一的。在经历厄瓜多尔那次事件之后的 4 年里，我逐渐熟悉了远离过去的印加族人统治区的另一个热带美洲森林地带的动植物。那里，另外一种不同的前哥伦布时期的文化——玛雅文化——曾经繁荣过。我来到了离危地马拉与墨西哥边界不远的伯利兹的西北部一个叫做恰契池（Chan Chich）的地方。恰契池在当地的玛雅语中是“小鸟”的意思。

今天仍有许多操玛雅语的人住在这里，而且在中美洲的这一

区域，古典玛雅文明的遗迹随处可寻，尤其是在一些古城的遗址上，无不反映出昔日的文明。其中最伟大、最辉煌的古城之一便是迪卡城（Tikal），它位于危地马拉的东北角，距恰契池不到100英里，曾经拥有巨大的金字塔和庙宇。

关于一千多年前古典玛雅生活方式的崩溃，有过许多的推测，但真正的原因至今仍是个谜。人们一直在围绕这个问题争论不休。是普通百姓对在统治者和贵族的命令下劳作感到厌倦了吗？是他们对维护上流社会的权力并将社会各阶层联合在一起的宗教制度失去信心了吗？是众多的城邦之间的战争导致了衰亡吗？是因为那曾养活了雨林中如此庞大的人口的出色的生产技术最终也黔驴技穷了吗？考古学家继续寻找着线索，以解开这些及另外一些疑问。同时，他们还得考虑该雨林中古典文明的最终崩溃与尤卡坦（Yucatán）这一更加贫瘠的地区的文化演变之间的联系。在托尔特克（Toltec）族人的影响下，尤卡坦半岛一些地方的古典文化被后古典时期文化继承了下来。

参观像迪卡城这样一个壮观的出土城市，当然令人难以忘怀，但对于那些追求新奇而不愿只局限于重蹈老路的人来说，他们也可以在丛林中找到其他的乐趣，比如突然发现一处地图上没有标出的、未被发掘的废墟。

一座废墟，初看起来像是森林中的一个小丘，上面长着各种灌木丛和树，跟一般的平地没什么两样。走近了，你会发现一些砖石结构，上面长满青苔、羊齿植物和蔓草。透过茂密的枝叶往里看，特别是在爬到高处往下看时，你便可以大致估计出该场地的大小和形状。看到这一切，你顿时幻想着，周围的丛林没有了，一个小小的、古典的玛雅建筑被挖掘出来，并被修复成昔日那显赫的模样。

与古城遗址一样，恰契池周围的森林中有颇多的野生动植物。在这里你能看到成年的獾皱缩着长鼻子，保护它们幼小的毛色不尽相同的后代。你也许会欣赏那些有着漂亮羽毛的火鸡，特别是那些公火鸡，它们浅蓝色的头上长满了小小的红色凸斑。晚

上，若用一只手电筒照向树顶，你可以看到大眼睛的蜜熊，它们的尾巴紧紧地卷缠在树枝上。

作为一个毕生喜欢观察鸟类的人，我特别喜欢记录那些蛰居于森林之中的各种鸟的声音。我常常通过摹仿它们的啼叫声来吸引它们，然后，等它们飞近时作仔细的观察（并更好地录下它们的声音）。12月末的一天，当我在寻觅鸟类的时候，我发现自己不知不觉地走到了恰契池附近的一条小径上。

前半段路上平静无事。我没能录下或看到我正在寻觅的鸟类。因此，一个多小时以后，我已不再认真聆听鸟叫声，也不再密切地关注树叶中的动静。我的心思已经转移到占据我大半辈子职业生涯的学科，量子力学上了。

作为一个理论物理学家，我的研究对象主要是作为宇宙中所有物质的基本构成单位的基本粒子。与实验粒子物理学家不同，我不必在工作时呆在大型加速器旁或地下深处的实验室里。我不需要直接使用精密的探测器，也用不着一个大的学术团体。我至多用得着一支铅笔、一些纸张和一个废纸篓。而往往连这些东西我也不需要。让我好好地睡一晚，而没有什么分心的事情，拥有时间，且没有忧虑和职责之类的问题来困扰，我就可以工作。不管是站在雨中，或半睡半醒地坐在晚班飞机上，还是徜徉在荒野小道上，我都可以工作。

量子力学本身并不是一种理论，它只是一个框架，现代所有的物理理论都必须与它相符。大家知道，在量子力学中，即便是理论上，也只允许有几率的计算，因此它要求我们舍弃作为早期“经典”物理学特征的决定论。物理学家们知道如何用它来预言一个实验的各种可能的结果。自1924年被发现以来，量子力学的预言一直都是行之有效的，即便是对于有关的特殊实验、特殊理论也是精确有效的。但是，尽管量子力学一直都是成功的，我们却并没有完全地、从最深层次上理解它的真正意义，特别是它对于理解整体的宇宙的意义。30多年以来，我们中的一些人一直在想方设法建构一个我所称作的量子力学的“现代诠释”。我

们希望这样一种诠释使得量子力学既能适用于宇宙，也能用来处理一些特殊事件，这些特殊事件包括单个物体，而不仅仅涉及那些容易复制信息物质的可重复性实验。漫步于恰契池附近的森林中，我思考着。从理论上来说，量子力学如何才能用来处理个性，如何才能用来描述鸚鵡会选吃哪些果实，或描述一棵生长着的树用什么方法来冲破庙宇遗址上的一块砖石。

突然，我的思路被打断了，我看见小道上离我约 100 码远处出现了一个黑影。我立即停下脚步，小心翼翼地举起双目望远镜，想要看个仔细。这是只中等大小的野生猫科动物，一只细腰猫。它横站在小道上，头转向我，使我能够看到它那特有的平顶头，长长的躯体和短短的前腿（有人根据这些特征称之为獾猫）。根据眼前这一动物的长度——约三英尺——和它那身灰黑色的毛，可以看出这是只成年的猫，并且是暗色种类，而非微红色种类。依我看来，这只细腰猫已经在那里站了一段时间了，它那浅褐色的眼睛一直盯着正为量子力学的神秘所困惑、而不断向它走近的我。尽管它显然保持着警觉，但它仍然是一付自由自在的神态。我们都站在原地，彼此对看着，约有几分钟光景。甚至在我走到离它只有 30 码远的距离，它仍然呆着不动。然后，在终于将我看清了以后，它掉转脸去，埋下头，慢慢地消失在树林中。

这样的景观并不常见：细腰猫是一种胆小的动物。由于栖息地墨西哥及中南美洲环境的破坏，细腰猫的数量近年来已经越来越少，现在已被收进濒危动物的红色清单中。可雪上加霜的是，细腰猫在处于关押状态时难以繁殖。与这一特殊的细腰猫相遇，使我又想起个体性的概念。我的记忆被拉回到早些时候一次与大自然中的个体相遇的情形。

1956 年，我还是加州理工学院的一位极年轻的教授。一次，我在加利福尼亚大学伯克利分校作了几堂理论物理方面的演讲之后，和我的第一个妻子玛格丽特一起乘车赶回帕沙第纳（Pasadena）。我们驾驶着一辆希尔曼闵克斯车，它的顶篷可以自由装卸。那时候，大学教师的着装要比我们如今正式一些——

我当时穿着一身灰色法兰绒西装，玛格丽特穿着毛衣、裙子，长统袜和高跟鞋。我们行驶在贝克斯菲尔德（Bakersfield）和洛杉矶之间，特姜隘口（Tejon Pass）附近的 99 路（当时尚未改建成高速公路）。以往每次经过这个地区时，我总喜欢仰望天空，希望看到加利福尼亚兀鹰。这次，我看到一只庞大的鸟在低空飞翔，然后很快就消失在路右边的小山后。我拿不准这是什么，但我决定弄明白。我把车开到路边，拿上小型双目望远镜，下了车，然后往山上跑去。路上大部分地段都有很深的红泥。走了一段后，我回头一看，见玛格丽特也跟了上来，就在后面不远的地方。她那漂亮的衣裙跟我的一样沾满了泥浆。我们一起来到了山脊，往下一看，只见 11 只加利福尼亚兀鹰正在山下的田野里啄食着一头死了的小牛。那时它们组成了加州兀鹰这一种族家庭中的一个大的团体。我们观察了很久，看着它们吃食，然后飞开一会，着地，在四周来回地走动，又继续啄食死牛。我早就听说过这种兀鹰有着巨大的身躯（它们的双翅展开时约有 10 英尺长），色彩鲜艳的光头，以及黑白两色的羽毛。现在一见，果然如此。使我感到惊奇的是，我们可以通过它们各自掉落的羽毛，非常容易将它们分辨开来。比如，一只鹰的左翅膀上失去了两根硬杆羽毛。另一只的尾巴上有个楔形缺口。没有哪只兀鹰的羽毛是完完整整的。这就产生了戏剧性的结果。每只鸟都是一个容易分辨出来的个体，这种显而易见的个性是一些历史事件的直接结果。我不知道兀鹰羽毛的掉落是一年一度的换羽，还是掉了以后就再也长不出来了（后来我得知兀鹰的羽毛每年都要全部更换一次）。我们平时都习惯于将人（和宠物）看作个体，而那些可分辨的兀鹰则大大地加强了我这样一个判断：即我们所观察到的世界，在很大程度上是由有着各自特殊历史的个体（有生命的或无生命的）所组成。

30 多年以后，再次站在中美洲的森林里，瞧着细腰猫曾经消失的地方，想着那些掉落了羽毛的兀鹰，并回忆起当时我一直在思考着量子力学中关于历史和个体性的问题，蓦地，我觉得我

的两个世界——一个是关于基本粒子物理，一个是关于兀鹰、细腰猫和玛雅废墟的——最终统一到了一起。

几十年以来，我一直保持着这样两种爱好：其一是，我喜欢我的科学研究，试图找到所有物质的最基本的组成要素所服从的普遍规律；其二是，我又喜欢在业余时间里探讨地球上生命与人类文化的演变。我总觉得两者以某种方式密切地联系在一起，但在很长一段时间内我不清楚它们究竟是如何联系起来的（除自然之美这一共同主题以外）。

表面上看来，基本物理与这些其他的业余爱好之间有着很大的差别。在基本粒子理论中，我们研究的是电子和光子这样的物质，这些物质无论在宇宙的何处都具有相同的行为方式。事实上，所有电子都是严格地可与其他电子交换的，光子也一样。基本粒子没有个性。

基本粒子物理的规律被认为是严格的、普遍的和不变的（除了可能的宇宙论之外），尽管如此，我们科学家还是可以通过一连串的近似而不断接近这些规律。相反，像考古学、语言学和博物学这样一些学科研究的是有个性的帝国、语言和物种，更详细地说是有个性的古代人工制品、单词和包括我们人在内的生物。在这些学科中，规律是近似的；而且，它们研究的是历史和生物种类或人类语言、文化所经历的演化类型。

但是，基本的量子力学物理规律确实可以引起个性。在这些规律支配下的宇宙因自然进化，产生了散布于宇宙之中的特殊物体，比如地球。然后通过地球上的一些过程，比如生物进化，同样的规律又导致了诸如细腰猫和兀鹰之类的特定个体的产生，这些特定的个体具有适应环境和学习的能力。最后，这些规律又导致了另一些有自己的语言和文化，并能够发现那些基本物理规律的特殊个体，比如人的产生。

曾经有几年的时间，我不但在研究那些规律本身，也在考虑那些规律之间的连锁关系。例如，我一直在想，经历了学习和生物进化过程的复杂适应系统，与非适应性的进化系统（如类银河

系和恒星系)不同的特征在哪里。复杂的适应系统包括正在学习母语的儿童;正形成对抗抗生素的耐药性的一群细菌;检验新理论的科学团体;一个获得创造性思想的艺术家的;一个形成新习俗或接受新迷信活动的社团;被设计用于发展赢棋新策略的计算机;发展各种方法来使本种族和谐地生活在一起,并和地球上其他生物和平共存的人类。

与量子力学的现代诠释及复杂性与简单性的意义方面的研究一样,关于复杂适应系统与它们的共同性质的研究也取得了稳定的进展。为了促进关于这类问题的学科间研究,我曾经帮助在新墨西哥的圣菲建立了圣菲研究所。

在伯利兹(Belize)与细腰猫的相遇,使我更强烈地认识到我和我的同事在更好地理解简单与复杂,宇宙与个体,自然的基本规律与我一直所喜爱的、关于地球方面的特殊学科等等之间的关系上所取得的进展。

对这种关系的性质了解得越多,我就越想把自己的想法与感受告之于众,一吐为快。我平生第一次产生了想写一本书的强烈愿望。

第二章 早期的思想

这本书的题目来源于我的朋友亚瑟·斯策（Arthur Sze）所写的一首诗中的一行。亚瑟·斯策是一位伟大的美籍华裔诗人，住在圣菲。我是通过他的妻子，多才多艺的霍皮（Hopi）编织工拉玛娜·萨吉斯特娃（Ramona Sakiestewa）结识他的。那行诗是这样写的：“夜晚徘徊的美洲豹，与夸克的世界息息相关。”

夸克是基本粒子，是原子核的组成单元。我和另外一位理论物理学家分别预言了它们的存在，并由我给它们取名为夸克。在本书的书名中，夸克象征着支配宇宙及其中的物质之发展变化的简单而基本的物理规律。可能在许多人看来，“简单”一词并不适用于现代物理学。这是一种错误的想法，事实上，本书的目的之一，就是要说明“简单”怎样适用于现代物理学。

美洲豹代表我们周围世界的复杂性，尤其是复杂适应系统所显示出来的那种复杂性。在我看来，亚瑟塑造的夸克和美洲豹的形象完全表达了我所称之为简单与复杂的自然界的两个方面：一方面，是关于物质和宇宙的基本物理规律；另一方面，是我们直

接观察到的包括我们自身在内的世界之纷繁的结构。而且，正如夸克象征着那些一经发现，即受到人们全面审视的物理规律一样，美洲豹是那些难以捉摸的复杂适应系统的一个暗喻，至少我觉得是这样。只是它始终拒绝让我们仔细观察，尽管它那刺鼻的气味在灌木丛中远远地就能闻到。

那么，我小时候是怎样迷上博物学这样的科目呢？后来为何又成为了一个物理学家呢？

一个好奇的孩子

我的启蒙教育得归功于我的哥哥本（Ben），他比我大9岁。我3岁的时候，他就教我认阳光饼干盒上的字。他还引导我进行鸟类、哺乳动物的观察和昆虫、植物的采集。我们住在纽约市，主要是在曼哈顿。但即便是这样的地方，也还是有可能进行自然现象研究的。我觉得纽约是一片被严重砍伐的铁杉森林。我们大部分时间都呆在布隆克斯（Bronx）动物园北边一片未被破坏的小树林里。其他幸存的动植物栖息地分别在这样一些地方：比如里面有淡水沼泽的范康特兰德公园；拥有沙滩和盐沼的斯塔顿岛的新村地区；甚至包括我们附近的中央公园，那里有许多有趣的鸟类，特别是在春秋两季的迁徙期间。

我开始意识到自然的多姿多彩，及这种多样的自然得以组织成一个整体的惊人的方式。如果你沿着沼泽的四周散步，看见一只北黄喉莺或听到它们啼叫“维契托，维契托，维契托”，你就知道，有可能还会发现另一只。如果你挖出一块化石古物，你就可能在附近再碰到另一块同样的化石。成为物理学家之后，曾经有一段时间我在思考，物理学的基本规律如何为这些现象的解释奠定基础？结果表明，答案与量子力学中处理历史的方式有关，而最后的解释依赖于宇宙的早期状态。但是，撇开这些深奥的物理问题不说，不那么深奥的物种形成问题作为生物学现象，的确值得好好地思考。

物种的存在绝非一件平常的事情；而且它们并不像人们有时声称的那样，只是生物学家头脑里的加工品。伟大的鸟类学家、生物地理学家恩斯特·梅伊尔（Ernst Mayr），作为一位新几内亚的年轻研究人员，他喜欢描述栖息在他工作的那个山谷中的 127 种鸟，但当地部落里的人们只能数出 126 种。他和他们数目不同的唯一差别在于，他们将两种极相似的吵刺莺混在了一起，而恩斯特接受过科学训练，能将两者分辨开来。比这种不同人们之间的一致性更有趣的是，鸟类自己也能识辨出它们是否属于同一种类。不同种类的动物通常不会进行交配，如果万一发生了交配，当然这是极罕见的事，产生的杂种将可能没有繁殖能力。事实上，关于物种构成的成功定义之一就是，不同物种的成员之间没有普通方法能使基因进行有效交换。

早年在大自然中散步的经历给我留下深刻印象的是，我们看到的蝴蝶、鸟和哺乳动物确实有着严格的分类。如果你出去散步，你会看到歌雀、泽雀、田雀和白喉雀等各种各样的麻雀，但你不可能看到任何介于某两个种类之间的麻雀。关于某两个群体是否属于同一种类的争执主要在如下的情况下发生，即当它们在不同的地方被发现，或它们属于不同的时期，并且至少其中一种是以化石的形式存在。本和我喜欢谈论物种如何通过进化而全部联系在一起，如同进化“树”上的叶子，上面有东西可以表示树的结构诸如属、科、目等分类。两个不同物种之间的关系到底有多近，取决于它们须沿着进化树向下搜寻，看在什么地方才能找到一个共同的祖先。

我和本并不是只局限于户外的活动。我们还去参观艺术博物馆，包括那些陈列着大量考古文物的博物馆（比如大都会艺术博物馆），和那些陈列着中世纪时期欧洲一些物件的博物馆（如修道院）。我们也读历史书。我们学会了认读用埃及象形文字写的碑文。我们出于好玩而学会了拉丁语、法语和西班牙语的语法。我们注意到法语和西班牙语的词汇（及英语中许多外来词）是如何由拉丁语演化而来。我们阅悉了印欧语系，并得知拉丁语、希

希腊语和本土英语中的许多单词有着共同的词源，并具有相当规则的变换规律。例如，英语中的“salt”对应于拉丁语中的“sal”和古希腊语中的“hals”，而英语中的“six”对应于拉丁语中的“sex”和古希腊语中的“hex”；英语和拉丁语中的起首字母s与我们用“h”表示的古希腊语中的重鼻音相当。这是又一种进化树，语言进化树。

历史过程，进化树，有组织的多样性和个体变异共存于我们的四周。在探讨多样性的过程中，我还得知，人类的活动在很多情况下正对这种多样性构成威胁。本和我是早期的自然风景保护主义者。我们痛心地看着纽约周围为数不多的、还算得上的自然区正变得越来越少，比如，一些沼泽就被人们排干填平。

本世纪30年代的时候，我们就已经深刻地意识到地球的有限性，人类活动对动植物群体的侵犯性，以及人口限制、水土保持和森林保护等等的重要性。自然，当时无论从态度上还是实际应用中，我都还没有将所有这些改革的必要性，同人类社会在全球范围内的进化联系在一起，尽管这正是我当今看待这一问题的方式。但即便是那时，我也确实有过一些关于人类将来的想法，尤其是在教科书与韦尔斯（H. G. Wells）的科学探险故事的影响下，这种想法越来越引起我们的关注。

我喜欢读韦尔斯的小说，也常常贪看短篇小说集，而且我和本还经常朗诵诗集中的英语诗。我们有时去听音乐会，甚至到大都会歌剧院去看歌剧。但我们很穷，大部分时间里我们只得满足于参加一些免费活动。我们尝试着弹钢琴，哼唱吉尔伯特（Gilbert）和苏利文（Sullivan）所作的歌曲及一些歌剧调子，但均是浅尝辄止。我们听收音机，试着收听很远处的电台，包括长波的和短波的，当我们成功地收听到了以后，就写信给他们，索要“证明卡”。我清楚地记得澳大利亚寄来的那些卡片，上面有笑鸪的图。

本和我想要了解这个世界并欣赏它，而不随心所欲地将它分割成若干部分。我们觉得自然科学、社会行为科学、古典语言与

文学及艺术等领域并无显著的差异。事实上，我从不相信这些区分有什么重要意义。人类文化的统一性一直深深地打动着。在这种人类文化中，科学担当着一个重要的角色。即便是自然与人类文化之间的差别，也并不那么明显。我们人类必须记住，我们是自然的一部分。

虽然专业化是我们的文化发展的一个必然的特征，但它仍需以各学科思想之间的统合作为其补充。这种统合的一个突出的障碍是，横亘在那些能自如地应用数学的人和那些不太懂数学的人之间的一条分界线。幸运的是，我在很小的时候就受到了定量思考这样一种习惯的熏陶。

虽然本也对物理学和数学怀有兴趣，但鼓励我学习这些学科的主要还是我父亲。我父亲是本世纪初期从奥匈帝国移民来美国的，他当时不得不中断了在维也纳大学的学习。到美国后，他又得帮助他的父母养家。他们比父亲早几年移民到美国，住在纽约，但他们入不敷出，难以维持生计。我父亲的第一个工作是在费城的一个孤儿院里干活，他在那里跟孤儿们学会了英语和棒球。虽然他开始学英语的时候已是一个年轻的小伙子了，但他的语法和发音竟也逐渐地变得无可挑剔。自记事起我就发现，人们从他发音从不出错就可以猜测他出生于国外。

在考察了若干种就业机会之后，他最后决定开办亚瑟·盖尔曼语言学校，教其他移民说完美的英语。他也教德语，并且雇用了一些法语、西班牙语、意大利语和葡萄牙语教师。学校取得了一定的成功，但1929年，也就是我出生的那年，情况发生了变化。不仅股票市场跌入低谷，而且，美国开始实行新的移民法，大大限制了往美国的移民。从那时候起，由于新的移民限额制，父亲学校的学生来源减少了，再加上经济的萧条，学校就更是濒临破产。到我3岁的时候，学校倒闭了。为了养活我们，父亲不得不在银行里找了份低薪但很稳定的工作。我在长大以后逐渐得知，我出生以前的那段时期作为昔日的好时光，时常为人们所怀念。

父亲对数学、物理和天文学很感兴趣，他每天总要花几个小时的时间来学习，熟读狭义、广义相对论方面及膨胀宇宙方面的书籍。在父亲的鼓励下，我对数学发生了兴趣。后来，通过自学，我逐渐地感觉到它的自治性和严密性，于是我开始喜欢上它了。

高中最后一年里，我要填写一份申请入耶鲁大学的表格，其中必须填上我可能的主攻学科。当我和父亲讨论专业选择时，他对我学考古学或语言学的计划不屑一顾，说我将会挨饿的。他建议我学工程。我回答说，我宁愿挨饿也不愿学工程，而且我所设计的东西往往都会散架的。（后来，在一次智能测验之后，我被告知，“除工程之外干什么都行！”）我父亲继而又建议我采取折衷的方案，学物理。

我向他解释说，我在高中学过物理，那是所有课程中最枯燥乏味的一门，而且它是我唯一学得不好的一科。我们曾经不得不硬记诸如7种简单机械：杠杆、螺杆、斜面等等之类的东西。并且，我们学了力学、热学、声学、光学、电学和磁学，但看不出它们之间有什么联系。

这时，我父亲的劝说由原来经济的原因改为以智慧与美之吸引力为缘由而劝导我学物理。他对我保证说，前沿物理学比高中课程所学的物理更加激动人心与令人满意，而且，我肯定会喜欢上狭义与广义相对论及量子力学的。我决定迁就老人。我想，到了纽海文之后，我总还可以有机会改变所学的专业。然而当我到了那里后，我却由于懒惰而没有立即去办理更改专业的事务。但是，不久之后我发现自己竟然对物理学着迷了。我开始喜欢起理论物理来。关于相对论和量子力学，我父亲的观点是对的。在学习这些科目时，我开始懂得，这些基本原理的优美深深地体现了自然界的美，正如阿比鸟的啼叫或晚上海豚发出的亮光体现了自然之美一样。

复杂适应系统

引力定律，尤其是爱因斯坦的广义相对论性引力理论，是简单的自然界基本规律的一个极好的例子，尽管许多人都认为后者一点也不简单。在宇宙的自然演化过程中，引力现象使物质形成类银河系，并进而演化形成恒星和包括地球在内的行星。从形成的时候起，这些天体就显示出复杂性、多样性和个性。但是随着复杂适应系统的出现，那些性质就有了新的意义。地球上的这种发展与地球生命的起源以及产生了如此丰富多样的物种的生物进化过程结合在一起。至少从某些方面来说，人类是地球上迄今为止进化出来的最为复杂的物种，他们已经成功地发现了包括引力理论在内的大量基本的简单性。

如圣菲研究所所开展的那样，关于复杂性与简单性的科学研究自然而然地包括探讨简单与复杂的意义；复杂适应系统之间的相似性和差异；这种复杂适应系统在各种不同过程中所起的作用，比如地球生命的起源、生物进化、生态系统中各种生物的行为，哺乳动物免疫系统的运作，动物（包括人类）的学习与思考，人类社会的演变，金融市场投资者的行为，以及为发展策略或在以往观察的基础上作出预言而设计的计算机软件及（或）硬件的使用，等等。

所有这些过程的共同特征是，每个过程中都由一个复杂适应系统来获取环境及其自身与环境之间相互作用的信息，总结出所获信息的规律性，并把这些规律提炼成一种“图式”（schema）或模型，最后以图式为基础在实际当中采取相应的行动。在每种情形中，都存在着各种不同的互相竞争的图式，而系统在实际当中采取的行动所产生的结果反馈回来，将影响那些图式之间的竞争。

我们人类中的每一个人都在以多种不同的方式发挥着复杂适应系统的作用。（事实上，心理学界早就在使用“图式”一词，

以它表示人类通常用来理解资料，并赋予它们以意义的概念框架。)

假定你在一个陌生的城市。在晚上的交通高峰期，你想在一条由市中心向外延伸的大道旁打手势让出租车停下。出租车从你身边驶过，但没有一辆车停下来。因为这些车都已经载有乘客，而且你还注意到这些计程车司机关掉了车的顶灯。啊哈！你必定会找一辆顶灯亮着的出租车。然后你看到一些这样的出租车，里面并没有乘客，但它们还是不停。这时，你需要修改图式。不久之后，你发现，车顶灯有内顶灯和外顶灯两种，其中外顶灯亮着表示“不载客”。你需要的是一辆只有内顶灯亮着的出租车。当两辆出租车在前面一个街区停下，在乘客下车后，司机们拧亮了内顶灯，这时你的新观点得到了证实。不幸的是，那些出租车很快就被别的步行者抢占了。又有几辆计程车在你附近载客完毕，但它们也被别人抢先占上了。为了找到成功的图式，你不得不将网撒得更大。最后，你看到，在街道的另一侧，许多只有内顶灯亮着的出租车都在沿相反的方向徐徐行驶着。你穿过街道，招呼了一辆，上了车。

作为更进一步的解释，假定你是一个心理学实验的实验对象。在实验中，实验人员给你看长长的一组常见物体的图片。这些图片代表着各种不同的东西，每个图片都会被展示多次。实验人员会不时地要求你预言下几个图像是什么，你得不断地在心中为这一序列建构图式，在所示图片的基础上建立一个关于该序列结构的理论。任何这种图式，以接下来出现的几张图片的情况为补充，使你能够对下面将要出现的图片作出预言。通常，最初的几次预言会出现错误，但如果该序列具有一个容易掌握的结构，预言与观察结果之间的差异会促使你舍弃不成功的图式，而支持那些能作出好预言的图式。很快，你就能够准确地预言下次将被展示的图片了。

下面再假定一个由一位虐待狂心理学家主持的类似的实验，实验中他所展示的序列根本没有什么真正的结构。你可能不停地

虚构图式，但这回除了几次偶然的机会之外，它们总是不能使你作出正确的预言。这种情形下，除了暗示“这个序列看来是杂乱无章的”之外，现实世界不能为你提供任何有益于图式选择的指示。但是被实验的人觉得难以接受这样一种结论。

不管是为新的冒险建立一个商业计划，或提出一个适用的食谱，还是学习一门语言，你都是在起着—个复杂适应系统的作用。当你训练一只狗时，你实际上正在面对一个运作中的复杂适应系统，而你自己也同样是在充当着这样一个系统（如果主要是后者在运作，那么就成狗训练你了，这也是通常发生的情形）。当你在金融市场投资的时候，你和所有其他的投资者都是单个的复杂适应系统，大家又组成一个共同的实体，这一实体通过所有这些组成部分为改善他们的地位，或至少谋求经济上的利益，所作出的努力而不断地发生演化。这样一个共同体自身也能够成为一个复杂适应系统。诸如公司或部落这样有组织的共同体，同样可以作为复杂适应系统。从整体看来，人类还没有很好地组织在一起，但在很大程度上，它已经起着复杂适应系统的作用。

并非只有通常意义上的学习才是复杂适应系统的运作。生物进化提供了大量这方面的例子。人类主要靠个人或集体的智慧来获得知识，而其他动物则通过直接的基因遗传来获得它们生存所必需的绝大部分信息。那些经过数百万年进化的信息，是有时候被人们相当模糊地称之为“本能”（instinct）的东西。出产于美国部分地区的王斑蝶，“知道”怎样大规模地迁徙到墨西哥城附近长满松树的火山山坡上去过冬。科普和科幻小说作家、生物化学家，已故的伊萨克·阿西莫夫（Issac Asimov）告诉我，他曾经同一个理论物理学家发生过争吵，那位物理学家否认狗知道牛顿运动定律。伊萨克愤怒地问道：“如果见到狗用嘴捕接飞碟，你还会那么说吗？”显然，那位物理学家和他所用的“知道（knowing）”一词各有不同的意思：那位物理学家所使用的“知道”，主要是指在人类科学活动的文化背景中学习的结果；而伊萨克所使用的“知道”是指贮存在基因中的信息，外加个体经验

所得的学识。

不管是草履虫、狗，还是人，他们从经验中学习的能力本身就是生物进化的结果。而且，进化不仅产生了学习，而且还产生了其他的新型复杂适应系统，比如哺乳动物的免疫系统。免疫系统经历了一个与生物进化自身相类似的过程，但是它所需要的时间是以小时或天来度量的，这样使个体能及时地判断出入侵的组织或外来的蛋白质并产生免疫反应，而进化则是以百万年计的。

事实表明，复杂适应系统普遍都会产生出其他的复杂系统。例如，生物进化会促使生物“本能”地解决所碰到的问题，而且它还会使生物体产生足够的智慧，从而通过学习来解决类似的问题。下页的图显示了地球上各种复杂适应系统之间的联系。约40亿年前，与繁殖及一些可遗传的变异有关的化学反应，导致了首批生命形式的出现，并进而导致组成生态群体中各种各样的生物的产生。然后，生命进一步导致了像免疫系统和学习过程这样的复杂适应系统的产生。对人类来说，符号语言能力的发展使学习扩展成复杂的文化活动，从而在人类文化中又产生了新的复杂适应系统：社团，组织，经济和科学活动。这里列出的仅为其中的几种。既然人类文化中出现了快速而又多功能的计算机，那么我们也可以使它们充当复杂适应系统。

将来，人类可以创造出新型的复杂适应系统。比如有这样一个例子，这一例子曾经在科幻小说中出现过，只是在50年代早期的一次谈话后，它才引起我的注意。已故的伟大美籍匈牙利物理学家列奥·西拉德（Leo Szilard）曾邀请我和我的一个同事去参加一个关于武器控制的国际会议。我的同事“穆福”·戈德伯格（“Murph” Goldberger，后来他是普林斯顿高级研究院的董事，再后又成为加州理工学院的校长）答复说，他只能参加会议的后半部分。列奥转而问我，我说我只能参加前半部分。列奥想了一下，然后对我们说，“不，那样不好；你们的神经元并不是互相联系的。”

将来某一天，不管是好事，还是坏事，这样的相互联系也许

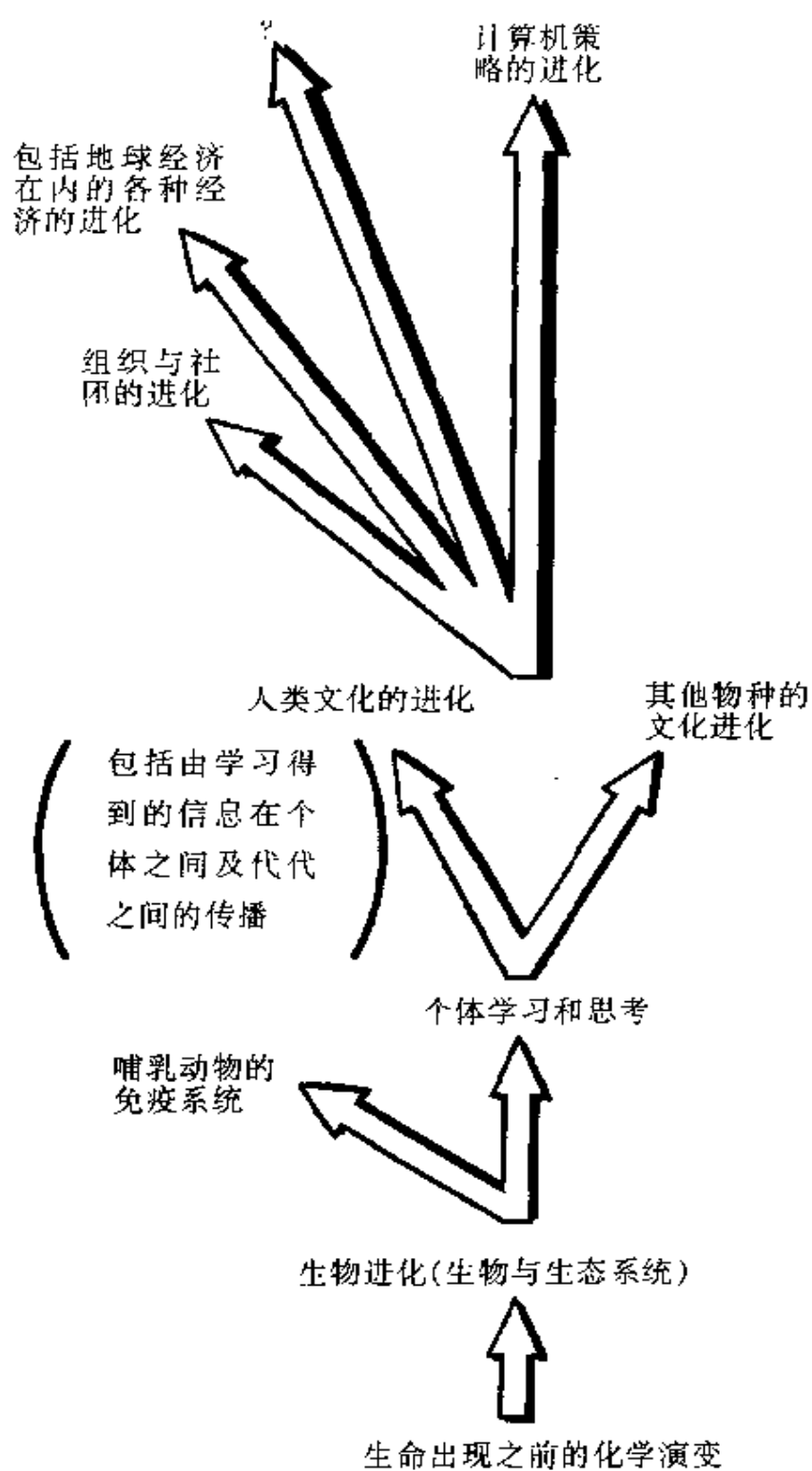


图 2-1 地球上的一些复杂适应系统

会成为可能。可以用金属丝将人和一个先进的计算机连接起来（不通过口语或像控制台那样的连系装置），通过计算机再进一步与另外一个或几个人相连系。以这种方式连系起来的两个人享有共同的思想和情感，而不存在用语言交流时所允许的那种选择性和欺骗性。（伏尔泰应该发表这样的评论：“人们……使用语言仅仅是为了使他们自己的思想隐藏起来。”）我的朋友歇尔莱·霍夫斯特德勒（Shirley Hufstedler）说，她不会向一对即将结婚的男女推荐这样一种方式，即用金属丝将他们两人连在一起。我想我也不一定会建议这样一种方式（尽管假定这一切都可能，而且会帮助我们解决一些极难解决的人类问题）。但它肯定会导致一种新型的复杂适应系统，一个由许多人组成的真正的混合体。

研究复杂适应系统的学者们不但逐渐地通晓了这些系统的差别，而且还熟谙它们的普遍性质。虽然它们的物理属性有广泛的不同，但它们处理信息的方式是相似的。这一共同的特征也许是研究它们如何运作的一个最好的起点。

第三章 信息和原始复杂性

研究复杂适应系统时，我们通常关注系统对信息的处理。我们研究信息怎样以数据流的形式到达系统。（例如，将一组图像展示给一个心理学实验对象，那么这组图像就构成了数据流。）我们关注复杂适应系统怎样寻找数据流中的规律性，如何从一些偶然的或者说随意的特征中把它们抽取出来，并将其压缩成一个随时都可能发生变化的图式。（在上例中，被实验者建构一个用来描述那组图像的推测性规律，并不断地对它进行修改。）我们观察得出的每个图式接着又怎样与附加信息相结合，从而得出一个适用于现实世界的结果：一个对被观察系统的描述，对待未发生事件的预言，或对复杂适应系统自身行为的规定。这里所说的附加信息，与从数据流中提炼规律性的同时被搁置到一边的偶然信息属于同种性质。（在心理学实验中，实验对象可能将建立在过去出现的图像之基础上的试探性图式，与接下来出现的图像所提供的信息联系起来，从而对下一步将要出现的图像作出预言。在这种情况下，附加的特殊信息，往往来源于从其中提炼出图式

的同一个数据流的后续部分。)最后,我们看这些描述、预言或行为怎样对现实世界产生影响,这些影响又怎样反馈回来,给各种不同图式之间的竞争施加“选择压力”(selection pressure);一些图式被降级或淘汰,而其中的一个或更多的图式则得以被保留下来,并可能升级。(在前面所举的例子中,如果一个图式所作出的预言与后续图像相抵触,那么接受实验的人多半要抛弃它,而能作出正确预言的图式则被保留下来,并被高度重视。这里,图式的检验是通过使用同一个数据流的后续部分来进行的,这些信息流首先产生了图式,并进而为作出预言提供特殊的附加信息。)复杂适应系统的操作可用图 3—1 来表示,该图强调了信息的流动。

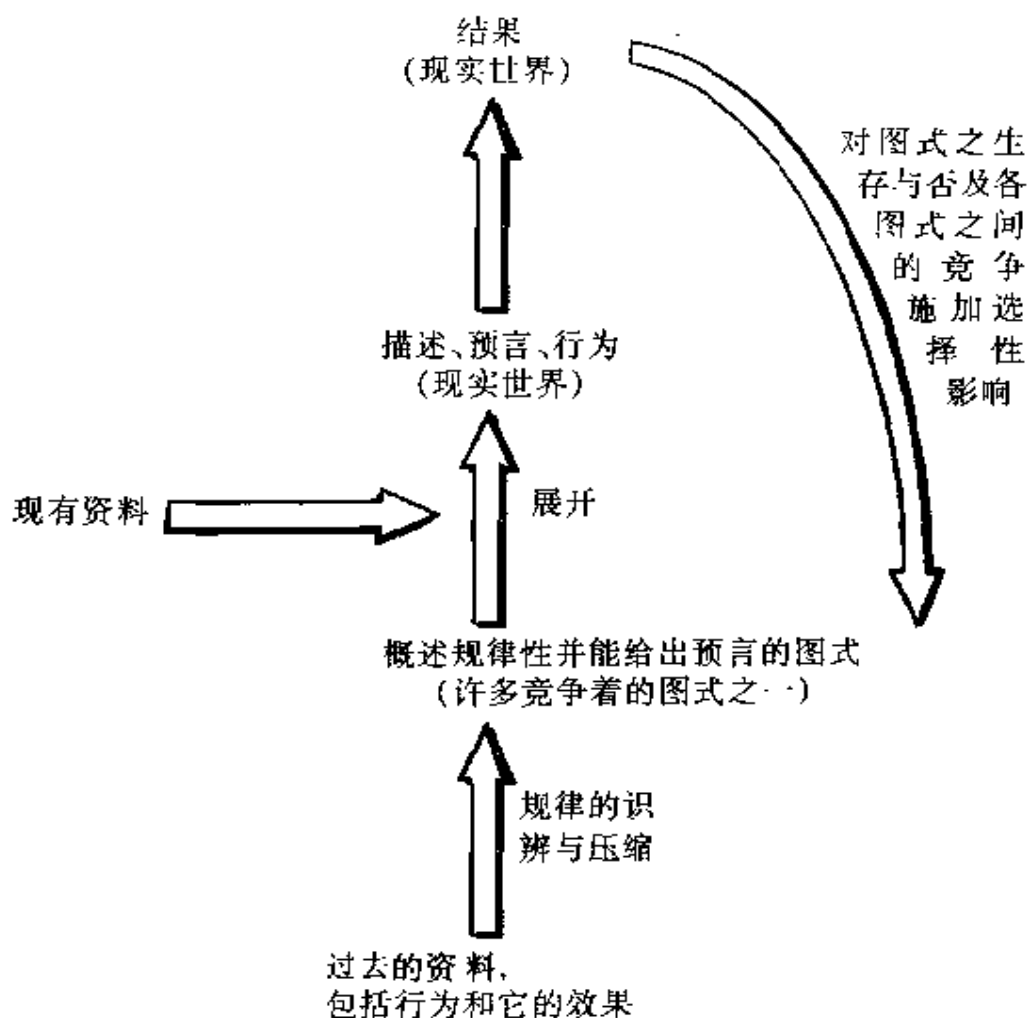


图 3—1 复杂适应系统的运作情形

像所有其他事物一样,复杂适应系统服从以物质和宇宙的基本物理规律为基础的自然定律。而且,在那些定律所允许的所有情形中,只有某些特殊的情况才允许复杂适应系统存在。

研究宇宙及物质的结构时,我们可以采用研究复杂适应系统时所沿用的方法:集中研究信息。那么,规律性的东西是什么呢?偶然事件与随意性从哪里进入规律之中呢?

量子力学与混沌中的不确定性

根据一个世纪以前的经典物理学,由运动规律和宇宙在任意时刻的状态,理论上就能预言宇宙的整个历史。现在我们知道,那是完全错误的。宇宙具有量子力学性质,这就是说,即使知道初始状态和物质的基本规律,我们也只能计算出一组宇宙各种可能历史存在的概率。而且,这种量子力学“不确定性”(indeterminacy)的程度远远超出了我们通常所讨论的范围。许多人熟知海森堡的不确定性原理,该原理否定了同时准确地测量粒子的位置和动量的可能性。虽然几十年来这一原理引起了广泛的注意(有时人们甚至用了一些易于引起误解的措辞),而量子力学所要求的附加不确定性却很少被人们提起。我们将进一步详细地讨论它。即便经典近似被证明是合理的,且量子力学不确定性被相应地忽略不计,也仍然存在普遍的混沌现象,这里力学过程的结果受初始条件如此大的影响,以至于初始状态的微小变化会导致最后结果显著的不同。

在下面摘自亨利·彭加勒(Henri Poincaré)1903年所著的《科学与方法》(*Science and Method*)中的一段话(艾华耳斯·彼德逊(Ivars Peterson)在《牛顿的钟》(*Newton's Clock*)一书中曾引用过)里,作者预先考虑了一些关于经典决定论和经典混沌的现代评论:

如果我们准确地知道自然规律和宇宙在初始时刻的状态,我们就能精确地预言该宇宙在下一时刻的状态。

然而，即使自然规律完全为我们所掌握，但无论如何我们却只能近似地知道初始位置。如果我们能以同样的近似程度预言后续状态，这也正是我们所要求的，那么，我们应该说现象被预言了，它受定律的支配。但事实并不总是这样；初始条件中的细小差别可能会导致最终结果的极大差别。前者微小的误差会酿成后者的巨大错误。准确地预言不再可能，所发生的一切都成了偶然的事件。

在本世纪 60 年代曾引起人们对混沌产生关注的几篇文章中，有一篇是气象学家爱德华·N·洛伦兹（Edward N. Lorenz）所写的。事实上，气象学经常提供极中肯的混沌例子。虽然卫星摄像术和使用强大的计算机进行的计算，使得天气预报从多方面来说都是相当可靠的，但是，天气预报依然不能总是准确无误地预言我们大多数人最想知道的情况——本地明天是否有雨。同样，一个已知的风暴系统将要通过哪里，它何时引起降雨，这和几天前，甚至几小时以前的风势与当地地理的详细情况，以及天空云层的物理状态等有关。气象学家所掌握的这方面的数据，哪怕只有极微小的误差，也会致使天气预报对计划集体野餐的人们来说毫无用处。

由于不能进行完全准确的测量，因而，混沌行为不但导致了量子力学原理中的不确定性，而且引起了经典层次的明显的不确定性。这两种不可预测性之间的相互作用，是现代物理中很有吸引力的一个方向，但目前很少有人对它进行研究。探求量子不可预测性与经典混沌不可预测性之间关系这一富有刺激性的工作，甚至如此深深地打动了《洛杉矶时报》（Los Angeles Time）的编辑与记者，以至于他们在 1987 年刊出了一篇关于这一主题的社论！作者指出这样一个明显的佯谬，即一些理论家研究在经典极限下显示出混沌状态的系统的量子力学性质，却不能发现叠于量子力学不确定性之上的混沌不确定性。

幸运的是，通过许多理论物理学家的努力，这个问题正逐步

得到澄清。这些物理学家当中包括我的一个学生托德·布隆(Todd Brun)。他的研究结果似乎证明,将混沌看成一种能将量子力学所固有的不确定性扩展到宏观层次的机制,从多方面来说都是非常有用的。

近来,出现了许多关于混沌的错误说法。从非线性动力学中一种专门名称来看,这一词已被借用来表示任何一种真正的或表面的复杂性或不确定性。例如,如果我就复杂适应系统作一次演讲,但在演讲中可能仅提起过一次与混沌有关的现象,或者也许一次也未提,那么讲完后,肯定会有人恭贺我作了一次关于混沌的精彩演讲。

看来,科学发现对文学界和大众文化产生影响的特征就是,从出现在专业刊物上到出现在通俗杂志或通俗读物里这一过程中,主要的幸存者是某些特殊的词汇,但即使是那些词,也往往只是得到了模糊或不正确的解释。一些重要的限制和区别,有时甚至是实际的概念本身,在这一过程中被丢掉了。看看“生态学”和“量子跃迁”的广泛使用,以至于新时代用语“能量场”,就很能说明这一点了。当然,你可能会争辩说,像“混沌”和“能量”这样的词最初并非是作为专门术语用的。但是,在通俗化的过程中,被曲解的是它们的专业意义,失去了它们最初的语义。

面对着将具有特殊用法的概念,在有效的文学机制中转换成没有意义的陈词滥调的越来越普遍,我们应当作出努力来阻止同样的命运降临到复杂性的各种概念上。我们将不得不专门讨论一下其中的一些概念,来看看每个概念适用于什么范围。

首先,这里所使用的“复杂适应系统”中的“复杂”是什么意思呢?实际上,这里的“复杂”一词不必有严格的意义,这是一种习惯用法。但是,这一词的存在还是隐含这样的意思,即任何这样的系统都至少具有某种最低程度的、并有适当定义的复杂性。

简单性是指缺少(或几乎缺少)复杂性,原意为“只包含了

一层 (once folded)”的意思；而“复杂性”一词则来源为“束在一起”的意思。(值得提出的是，表示层的“plic”及表示束的“plex”均来自于相同的印-欧语词根“plek”。)

各种不同的复杂性

简单性与复杂性这对反义词的真正含义究竟是什么呢？为什么说爱因斯坦引力简单，而金鱼复杂呢？这些都不是容易回答的问题——给“简单”下定义并不简单。恐怕一个概念不足以清楚地表达我们依直觉可得的复杂的观念。我们必须定义多种不同的复杂性，而有些可能还没有被想到。

定义复杂性的问题是怎样提出来的呢？其中的一种情况，就是计算机科学家对计算机解决某种特定问题需费多长时间的考虑。为了避免这种时间依赖于程序员的聪明程度，科学家们主要只考虑可能的最短解决时间，这就是常常称作的该问题的“计算复杂性”。

但是，即便是最少的时间也仍与计算机的选择有关。在定义各种不同的复杂性时，不断地出现诸如此类的对“背景的依赖性”(context dependence)。计算机科学家对于一组近似的问题特别感兴趣，但对长短并不关心；此外，他或她主要关心的是，当问题不断变长而没有限制时，计算的复杂性会发生什么变化。当问题趋于无限大时，解答所需最少时间怎样随问题长短的变化而变化？这样一个问题的答案可以与计算机的细节无关。

事实表明，计算复杂性是一个相当有用的概念，但是它与我们使用“复杂”一词时通常所指的意思不同，比如，它与我们所说的高度复杂的小说情节，或组织构造中的复杂就不一样。在这种情况下，我们更加关心的是，描述所研究系统某些性质需要多长的信息，而不是在计算机上解决某个问题需多长时间。

例如，几十年来，生态学界一直在争论，像热带森林这样“复杂”的生态系统比相对“简单”的生态系统，如在帕沙第纳

后边圣加布里尔山高处所发现的橡树和针叶林，是否具有更大或更小的弹性（resilient）。这里的弹性是指从气候变化、火或一些其他的环境变更中幸存下来（或甚至从中受益）的可能性，它与人类的诞生与否无关。现在看来，那些认为简单一点的生态系统更有弹性的科学家们，似乎正成为这场争论的赢家。但他们所说的简单与复杂是什么意思呢？答案当然与对每个森林所给予的描述之长度有一定的关系。

为了得出有关森林复杂性的很基本的观念，生态学家们可能会数每个森林中树的种数（典型温带高山上森林中树的种类不到一打，而一个低地热带森林中却有数百种）。他们也可能数鸟类或哺乳动物的种类；同样，结果也是热带低地的种类多一些。如果考虑昆虫，那差别就更加显著了——试想一下一个赤道雨林中会有多少种昆虫。（这个数目一直被认为很大，而最近的估计又大大地增加了。从史密斯尼安研究所（Smithsonian Institution）的特里·爱尔温（Terry Erwin）的研究开始，科学家们作了这样一些实验，也就是将雨林中一棵树上的昆虫全部杀死，并收集起来。结果发现，昆虫的种类比以往所估计的数目要多 10 倍，而且其中许多种类是第一次被发现。）

除物种之外，你还可考虑其他因素。生态学家们常常还要考虑森林中各种生物之间的相互作用，比如食肉动物与被捕食动物之间，寄生物与寄主以及授花粉者与被授者等等之间的关系。

粗 粒 化

那么，他们会考虑到什么层次的细节问题呢？他们会去注意微生物、甚至病毒吗？除了考察明显的相互作用，他们还要考虑极微弱的相互作用吗？显然，他们会在某个地方打住，而不可能无穷尽地追究下去。

因此，定义复杂性时，有必要指出对系统的描述要达到什么

样的精细度，而更小的细节可以被忽略。物理学家称这为“粗粒化”（coarse graining）。这样一个名词可能源于呈颗粒状的照片。当一个照片中的细节太小，看不清楚，而需要放大许多倍时，放大的照片上会显示出一些单个的颗粒。这时照片上只有若干个点来表示一个很粗糙的像，而不再有清晰的细节。安东尼奥（M. Antonioni）的电影《放大》（Blow - Up）指的就是这样一种放大。一个照片的颗粒状态显示出它所能提供的信息数量。如果胶片呈明显的颗粒状，那么整个照片就只能粗略地反映出所拍摄的物体，显示出非常粗糙的颗粒化。如果一个侦察卫星拍下了一件以前所不知道的“复杂”武器的照片，那么它的复杂性的程度将与照片的颗粒状有关。

确立了粗粒化的重要性之后，我们还面临着怎样定义所研究系统的复杂性的问题。例如，一定数量的人（姑且说 N 个人）之间的简单或复杂的通信方式的特点是什么呢？当一个心理学家或研究组织的学者想要比较 N 个人在各种不同通信条件下解决问题的好坏或快慢时，就存在着这样的问题。一个极端情形（我们不妨称之为 A 情形）为，每个人独立工作，彼此之间没有任何通信。另一个极端情形（称为 F 情形）是，每个人都可以随便与任何其他其他人通信。A 情形显然很简单。那么 F 情形是比它复杂得多，还是几乎与它一样简单呢？

至于细节的层次（粗粒化的程度），我们假定所有的人都被认为是相同的，没有任何个性。我们在图中用点来简单地表示他们，而且点的位置也不重要，所有的点都是可以互相交换的。任何两个人之间的通信要么是允许的，要么是禁止的，而没有什么模棱两可的状态。每两者之间的通信用连接该两点的线来表示（线没有方向性）。这样得出的图就是数学家们所称作的“无向图”（undirected graph）。

描述长度

有了这种方法来定义细节的层次，就可以研究一种连接方式的复杂性是什么意思了。首先我们考虑点数很少的情形，比如 8 个 ($N=8$)。这时我们可以容易地画出一些连接方式，包括一些无足轻重的。图 3—2 表示出 8 个个体中可能存在的一些通信

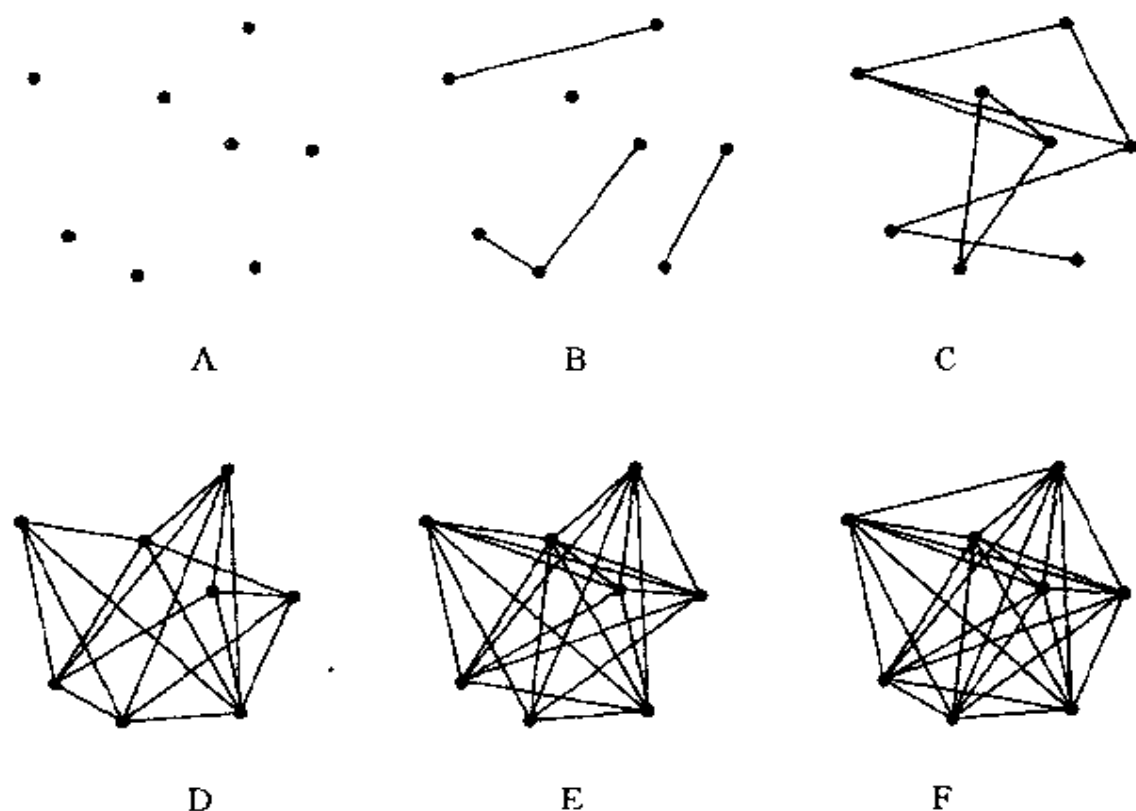


图 3—2 8 个点之间的一些连接模式

方式。在 A 情形下，任何两点之间都没有连线。在 B 情形下，某些点之间有连线，但有的点与任何其他点之间都没有连线。在 C 情形下，每个点都有连线，但不是任意两点之间都有连线。在 D 情况下，所有的连线是 C 情形下所没有的，而 C 情形下的连线又是 D 情形中所没有的。我们可以称 D 为 C 的互补物，反之亦然。同样，E 与 B 也是互为补充的。F 与 A 也是：A 情形中没

有连线，而 F 情形中有着所有可能的连线。那么，哪种模式更复杂呢？

每个人都会同意没有连线的 A 模式简单，B 模式中有一些连线，因而比 A 模式复杂或不如 A 模式简单。其他模式又怎么样呢？一个很有趣的情形是关于 F。对 F 模式的第一印象可能是，它是所有模式中最复杂的，因为它的连线最多。但这种判断合理吗？所有点之间都有连线的性质与没有任何连线的性质难道不是一样的简单吗？或许 F 与 A 一样，位于复杂性等级的最底端。

这样的推理使我们想起当初这样一个设想，即至少有一种定义复杂性的方法，那就是使用描述长度（the length of its description）的概念。这样一来，F 模式确实与它的互补模式——A 模式，一样简单，因为“所有点之间都有连线”与“所有点之间均无连线”两种描述有同样的长度。而且 E 的复杂性与它的互补物之复杂性也并无多大区别，因为加上“互补物”一词没有使有关的描述显著变长。对于 D 模式与 C 模式，也是如此。总的来说，互补的模式有着近乎相同的复杂性。

B 模式和 E 模式明显比 A 模式与 F 模式复杂，C 模式与 D 模式也是如此。B、E 模式与 C、D 模式之间的比较则要复杂一些。以描述长度这一简单的标准来看，C、D 模式似乎更复杂，但是否的确如此，在一定程度上与用于描述的语言有关。

在进一步讨论关于复杂性与描述长度有关这一观点之前，有必要指出，我们在前面用来表示人们之间通信方式的图表也可以用于另外一种情形，一种如今对科学、技术及商业均有着重大意义的情形。目前，计算机科学家们在研究与使用一种新型的“并行处理”（parallel processing）计算机方面取得了很大的进展，这种新型计算机在解决某些特定问题方面比传统计算机更加有效。不像单个的大型计算机那样，连续不断地解决一个问题，直到完成为止，并行处理使用一批小型计算单元，这些单元同时运行，其中某些单元之间以一定的通信模式连接着。这里，你可能又会问到，这样一种通信联系方式比另一种更复杂，意味着什么呢？

事实上，问我这个问题的是一位正在设计并行处理计算机的物理学家，他重新引起了我对复杂性定义问题的兴趣。

前面我们考虑了通过计算物种、相互作用等的数目来定义简单与复杂的生态群体的可能性。譬如，如果一个群体中各种各样的树都被列出来了，那么这一部分描述的长度与树种数是大致成正比的。因此，在这种情形下，描述长度也能有效地用作衡量复杂性的尺度。

对背景的依赖性

如果复杂性用描述长度来定义，那么它还显然不能描述事物的固有特性。因为，描述长度与作这一描述的人或物有关。（这使我想起詹姆士·瑟伯尔（James Thurber）的小说《田野中的玻璃》（*The Glass in the Field*）。小说里一只金翅雀向其他鸟作了一个关于与玻璃相撞的简要描述：“我在飞越一块草地的时候，突然空气在我身上结晶了。”）任何关于复杂性的定义都不可避免地特定背景有关，它甚至是主观的。当然，系统描述的精细度本身就已经有几分主观性了——它依赖于观察者或观察设备。那么，实际上，我们正在讨论一个或更多的依赖于一个系统对另一个系统的描述的复杂性的定义，这里，施行描述的系统假定为一个复杂适应系统，它可以是一个人类观察者。为了现在的目的，我们不妨假定描述系统就是人类观察者。

为了使描述长度的概念更加精确，我们应该避免通过显示某一事物来对它进行描述；很显然，显示一个复杂适应系统与显示一个简单系统一样地容易。因此，我们只关心以通信的方式被传递给远处某个人的描述。同样，我们也可以很容易地给某个相当复杂的物体取名为“山姆”或“朱蒂”，从而使得对它的描述大大变短。因此，用于描述的语言必须是事先为大家所公认的，不能为描述而新造一些术语。

当然，即便如此，这里也仍然存在着多种随意性与主观性。

描述长度将随所使用的语言以及通信者对他们所共享之世界的了解与理解的不同而不同。例如，在描述一头犀牛时，若双方都知道什么是哺乳动物的话，那么关于犀牛的信息就可以缩短。如果要描述一个小行星的轨道，那么双方是否都懂得牛顿引力定律和牛顿第二运动定律，将产生很大的差别——双方是否知道火星、木星与地球的轨道，对描述长度也很重要。

简洁性和原始复杂性

如果由于一些无用的字、词而使得一个描述很长怎么办呢？我想起了这样一个故事，一个小学教师给她的学生布置家庭作业，要求他们写一篇 300 字的作文。有个学生由于整个周末都用于玩耍，没有做作业，结果他在星期一的早上写了这么一段：“昨天晚上，邻居家的厨房里着火了，我把头伸出窗外，大喊，‘起火了！起火了！起火了！……’”这个小孩将“起火了”重复了很多遍，直到凑足了 300 字为止。然而，如果没有 300 字这一要求，小孩就会写“叫了 90 多遍‘起火了’”来表达同样的意思。因此，在讨论复杂性的定义时，我们关心的是用来描述系统的可能的最短信息的长度。

下面几点可以概括起来作为“原始复杂性”的定义：用双方事先共享（且彼此均知道共享这一事实）的语言、知识及理解，将一个已知粗粒化程度的系统描述给远处某人时，所用最短消息的长度。

某些用来描述系统的常见方法是产生不出最短消息的。例如，如果我们将系统的各个部分（比如汽车的部件或人体的细胞）分开描述，并讲述这样一些部分怎样组成一个整体，那么，我们忽略了许多压缩消息的机会。在那些机会中，我们可以利用各部分之间的相似性。例如，人体中的大部分细胞有着相同的基因，并有很多其他的共同特征，而同一个组织中的细胞则更加相似。最短的描述应将这些因素考虑进去。

算 法 信 息 量

某些信息论专家使用一个与原始复杂性极其相似的量，不过他们的定义更专门化，而且自然而然地牵涉到计算机。他们拟想出一个具有给定粗粒度的描述，这个描述用一种给定的语言来表示，然后再用某种标准编码程序译成一串0和1。每个被选的数1或0被称为一个“比特”（bit）。（本来，比特是“二进制数”的缩写，说其为二进制的，是因为只有两种可选的数字，而对通常的十进制数来说，则有10个：0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9。）他们关心的是那个比特串或“消息串”（message string）。

他们定义的量称为“算法复杂性”、“算法信息量”（algorithmic information content）或“算法随机性”。当今，“算法”（algorithm）一词指的是一种计算规则，通过意义的延伸，又可以指一个计算程序。下面我们将会看到，算法信息量指的是一种计算机程序的长度。

本来，算法一词的意思不是这样的。这个词听起来像是出自希腊语“算术”（arithmetic）一词，但事实上，那只是个假象。“algorithm”中的“th”是由“arithmetic”中的“th”类推而被插入的，实际上它本不属于那里。一个更能反映语源的拼写应该是“algorism”，它是一个人的名字，正是通过这个人所写的书，“零”才被首次引入到西方文化中。他就是9世纪的阿拉伯数学家穆罕默德·艾宾·穆沙·阿尔花拉子模（Muhammad ibn Musa al-Khowarizmi）。这个姓表明，他的家族来自咸海南边花拉子模地区，现为新近独立的乌兹别克斯坦共和国的一部分。他写了一篇数学论文，题目中包含“阿尔加布”（al jabr）这一阿拉伯的词，意为“移项”，我们现在的“代数”一词就出自这里。最初，“algorism”（计算）一词指的是十进制法，人们认为它主要是通过将阿尔花拉子模的“代数学”翻译成拉丁文而由印度传入欧洲的。

算法信息量 (AIC) 是本世纪 60 年代由三个创始者各自率先使用的。三个人中, 一个是伟大的俄罗斯数学家安德里·N·柯尔莫哥洛夫 (Andrei N. Kolmogorov), 一个是当时只有 15 岁的美国人格里高里·蔡廷 (Gregory Chaitin), 还有一个也是美国人, 叫雷·索洛莫洛夫 (Ray Solomonoff)。每个人都是假想一个理想的多功能计算机, 它可以存贮无限大的信息量 (或者信息存贮量有限, 但可随需要而任意扩充容量)。这个计算机配备有特殊的硬件和软件。然后他们考虑一个特殊的信息串, 并寻求一个计算程序, 使计算机打印出这一信息串, 随后停机。一个最短的程序的长度就是该信息串的 AIC。

我们已经看到, 源于粗粒化和用来描述系统的语言等因素的主观性或随意性, 是原始复杂性之定义所固有的。在 AIC 中, 又产生了附加的随意性来源, 即用来把对系统的描述转化为一个比特串的特殊编码程序, 以及与计算机有关的硬件和软件。

数学信息理论家们并不担心这种随意性, 因为他们通常只关心一些极限情形, 在那些极限情形下, 有限的随意性就变得不那么重要了。他们喜欢考虑一些相似而长度渐增的比特串, 研究在长度趋于无限大的过程中, AIC 如何变化。(这使我想起来, 计算机科学家们如何喜欢处理大小递增并趋向无穷的一系列相似问题的计算复杂性。)

让我们回到理想化并行处理计算机问题上来, 这样一个计算机由一些计算单元组成。我们用点来表示这些单元, 用线表示这些单元之间的通信连接。这里, 柯尔莫哥洛夫、蔡廷和索洛莫洛夫是不会对仅 8 个点中各种可能的连接方式的 AIC 感兴趣的。他们关注的是当 N 趋向无限大时, N 个点中的连接情况。在这种情况下, 由于使用某个计算机而不是另一个, 使用某种编码程序而非另一种, 使用一种语言而不是另一种等等所造成的差异, 而导致 AIC 方面的某些差别 (例如, 最简单的连接方式与最复杂的连接方式之间的差异), 相形之下都不那么重要了。一个信息理论家关心的是某个特定的 AIC 是否随 N 趋向于无穷而不断

增长，如果是，增长的快慢如何。他或她不怎么关心某个 AIC 与另一个 AIC 之间由于系统描述中的种种不定性而引起的无关紧要的差异。

我们可以从那些理论家那里获得一些有趣的经验，那就是，即使我们不限于研究那些趋于无限大的系统，我们也应该懂得，随着比特串逐渐变长，关于简单性与复杂性的讨论变得越来越有意义。在另一种极端情形，即比特串中只有一个比特，谈论简单性与复杂性显然是毫无意义的。

信息的定义

现在我们必须对算法信息量与信息作出区分。这方面有一些人，比如，现代信息理论的奠基人克劳德·香农（Claude Shannon）曾经讨论过。信息主要涉及到从被选物中作出抉择，如果那些被选物可以简化为一序列两种选择，其中每种选择的或然性完全一样，那么，我们可用一种最简单的方式将其表示出来。例如，假若你得知抛硬币的结果是反面而不是正面，那么你就获得了一个比特的信息。如果你获悉三次连续抛币的结果是正面、反面和正面，那说明你已经获得三个比特的信息。

“二十个问题”的游戏在或然性相同或或然性近乎相同的一连串两种选择中，提供了一个表示各种极不相同的信息的极好例子。游戏由两个人来玩，第一个人构思一个东西，然后第二个人要在被告知它是动物、蔬菜、还是无机物之后，用 20 或不到 20 个问题来猜出这个东西。问题的答案只能是“是”或“否”；每次回答都是一次两种选择。对第二个人来说，他提出的问题要尽可能在两个或然性接近相同的被选物之间作出选择，这将会对自己最有利。例如，在知道该东西是无机物时，提问者不应该直截了当地问它是不是霍普（Hope）钻石。他可以问，“它是天然的（而不是人工制造或改造的）吗？”这里，肯定回答和否定回答的概率是大致相等的。如果回答是“否”，那么下一个问题可以问：

“它是一个特殊的物体而非一类物体吗？”当回答“是”与“否”的概率相等时，每个问题将引出一个比特的信息（这是一个问题所能引出的最多的信息）。20 个比特的信息相当于从 1,048,576 个或然性相等的被选物中作出一个选择，其中 1,048,576 是 20 个 2 的乘积（2 的 20 次方）。这一乘积是长度为 20 的各种不同比特串的数目。

要特别提及的是，在讨论 AIC 与信息时，比特串的用法是不一样的。在算法信息量情形下，考虑的是单个的比特串（最好是长比特串），它内部的规律是用一个通用计算机打印出该比特串到停机的最短程序长度（用比特表示）来测度的。与之形成对比的是，在信息的情形下，你可能考虑从具有给定长度的所有各种不同的比特串中作出一个选择。若它们的或然性均相同的话，它们的长度就是信息的比特数。

你也可以考虑一组比特串，比如或然性相同的一组，每个比特串都有其特定的 AIC 值。在这种情况下，定义一个由比特串的数目及该组比特串的平均的 AIC 值所决定的信息数量，往往很有用。

压缩和随机串

算法信息量有一个很奇特的性质，为了对它进行讨论，我们有必要先来看看不同消息串的相对“可压缩性”。对于一个有给定长度（不妨假设很长）的比特串来说，我们可以探究，何时其算法复杂性高，何时其算法复杂性低。如果一个长的比特串为 110110110110110110110...110110，那么，我们可以通过一个表达“将 110 打印若干次”的极短的程序来得到它。这样一个比特串具有一个很低的 AIC，尽管它的长度很长。这意味着它具有很大的可压缩性。

与此相对照的是，在数学上可以证明，大多数具有某一给定长度的比特串是不能压缩的。换句话说，能够产生这些串（并进

而使计算机停机)的最短程序为,在 PRINT 后写上整个数串。具有给定长度的这样一个比特串有着最大的 AIC。这儿没有任何规则、算法及理论能够进一步简化这种比特串的描述,从而使之能被用一更短的信息来描述。这样的比特串被称为“随机”串,因为它没有规律可循,因此不能被压缩。随机串具有最大的 AIC,这一事实可以解释为什么 AIC (算法信息量)又可称为算法随机性。

AIC 的不可计算性

AIC 的奇特性在于它的不可计算性。尽管大多数比特串是随机的,但是我们没法准确地知道究竟哪些是随机的。一般来说,我们不能肯定某个给定比特串的 AIC 一定不低于我们所认定的。这是因为总可能有一个理论、一种算法能使该比特串被进一步压缩,只是这个理论、算法我们永远也发现不了。更严格地说,我们无法找到能导致进一步压缩的所有理论。格里高里·蔡廷曾在几年前证明过这一论点,他的工作很容易使人想起库特·哥德尔(Kurt Gödel)一个著名结论的一部分。

哥德尔是一个数学逻辑学家,他在 30 年代早期所作出的关于数学公理系统的局限性的发现,曾经震动了整个数学界。在他之前,数学家们曾希望可以设计这样一个数学公理系统,理论上它可以被证明是自洽的,并能用来推证所有数学定理的正确性或谬误性。哥德尔证明这些目的一个也不能实现。

像这样的否定性结果往往象征着数学或科学上的巨大进步。我们可以比较一下爱因斯坦关于没有绝对时间或空间,而只有联合时空的发现。事实上,哥德尔和爱因斯坦是好朋友。50 年代早期,在新泽西的普林斯顿高级研究院,我常常看见他们一起步行去工作,但看起来他们这一对给人一种古怪的感觉。哥德尔个子很小,在他的衬托下,爱因斯坦看起来相当高。他们曾经讨论过深奥的数学或物理问题吗?(哥德尔不时地研究一些与广义相

对论有关的问题。)或者他们的谈话仅仅是关于天气和他们自身的健康问题?

哥德尔的结论中与我们的讨论有关的部分,是关于不可判定性的问题,即:对于任何一个数学公理系统,原则上总存在一些命题,这些命题在已有的公理基础上不可判定。换句话说,理论上有一些定理既不能被证实,也不能被证伪。

最突出的不可判定的命题是与公理无关的一种陈述。你可以通过引入这样一个陈述作为一个新公理,或引入一个与之相反的陈述,来扩充已有的那组公理。

但是,另外一些不可判定的命题则具有不同的性质。例如,假定一个关于正整数的不可判定的命题的形式如下:“每个大于2的偶数都有如下性质……”如果这样一个命题有任何例外,原则上我们可以把它找出来。我们可用足够长的时间,连续检验每个偶数(4, 6, 8, 10, ……),直到发现一个不具备命题中所说性质的数为止。这样就直接证明了该命题是错误的,同时也推翻了它的不可判定性,因为不可判定性的严格意义是,命题不能被证实或证伪。因而,这一命题没有例外情形。一般来说,“真实”这一词的意义是说,该命题是真实的。

下面我们将更加具体地讨论这一点。考虑这样一个特殊的命题,它的正确性经过几个世纪的科学家们的努力也没有得到证明,尽管也没有发现任何例外情况。这个命题就是哥德巴赫猜想(Goldbach's conjecture),其内容是,每个大于2的偶数等于两个素数之和。素数是大于1,且不能被自身和1以外的任何数整除的数。根据这一点可知,最小的几个素数是2, 3, 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 29, 31和37。从列出的这些数中可以看出,4和62之间的任何偶数都可以用至少一对素数之和来表示。计算机的计算表明,某个相当相当大的数以内的各个偶数都有这样的性质。然而,这样的计算还不能说那个猜想就被证实了,因为对于更大的数它仍然可能失败。只有严密的数学证明才能将猜想变成一个已证明的定理。

没有理由认为哥德巴赫猜想是不可判定的，我们只是假定它是不可判定的。那么由此可知，它应该是真实的，尽管不能证明这一点，因为它可能没有任何例外的情况。任何大于 2 的偶数而不能表示为 2 个素数之和的存在，将会否定这个猜想，并因此推翻它的不可判定性。

如蔡廷所证明的那样，在问题的背景中往往隐藏着这样一些正确但不可证的理论，或许其中有一个理论能使一个我们认为不可压缩的长信息串能被压缩，或使一个我们认为是最短的信息串能被进一步压缩。因此，一般来说，我们不能确定算法信息量的值；只能给出一个它不能超出的上限。既然只能确定它在低于这一上限值的范围内，因而 AIC 是不可计算的。

不可计算性这一性质给我们带来种种不便，但使我们不能用算法信息量来定义复杂性的，还有另一个不同的原因。尽管通过 AIC 可以引入一些有用的概念，如粗粒化、信息串的可压缩性，以及由观察系统所得出的描述长度等等，但它有一个实实在在的缺陷：它的另一个名字算法随机性就暴露了这一点。随机串的算法信息量最大。它（AIC）是衡量随机性的尺度，但随机性无论是在普通会话中，还是在大多数科学场合中都不是“复杂”的意思。因而 AIC 不是真实的或有效的复杂性。

但是，在讨论随机性的时候需多加小心，因为这个词的意思在不同的场合并不总是一样的。我第一次意识到这种暗藏的危险，是在很久以前与兰德（RAND）公司的接触中。

第四章 随机性

50年代我刚到加州理工学院工作的时候，我需要找份顾问工作来维持家庭的生计。加州理工学院的教授们每周可以出去做一次顾问工作，我跟同事们打听可去的地方。有一两个人建议我到兰德公司去，该公司位于著名的码头和玛斯卡滩附近的圣莫尼卡（Santa Monica）。

第二次世界大战之后不久，作为美国空军 RAND 计划[RAND 为研究与发展（research and development）的简称]，兰德公司成立了。它的使命就是诸如使军事策略与分派给军队的任务协调一致，给美国空军提供建议，并设计合理的方法。不久之后，公司的作用就扩大为包括在一系列问题上给政府提供建议，这些问题很多都与防御策略有关。兰德计划依然很重要，但是它只给公司提供部分经费，这样，公司成了一个不盈利的企业，于是它扩充为民间提供服务。兰德雇用各种领域的专家，包括政治学、经济学、物理学、数学及军事作战研究方面的专家。

物理所所雇用的成员大部分都是理论物理学家，我也加入了

他们的行列。我开始作一些非机密研究，并为此挣得一份薪水。我们从加州理工学院来的 3 个人组成了一个车辆合用队，每逢星期三到兰德去工作。

“随机”的几个含义

对兰德公司所作的最初几次访问中，我记得最清楚的是，他们递给我一小堆新近提出来的报告，好让我熟悉正在进行的一些工作。其中有一份报告的题目是“兰德随机数表”(RAND Table of Random Numbers)，尽管读起来不那么精彩，但它毫无疑问很有用（不过我被告知，一些图书管理员根据“及 100, 000 个正常的偏差”这一小标题，将其归入变态心理学一类）。

关于这个报告，我觉得有趣的是里面飘出一小张纸，掉落到了地上。我拾起来一看，发现是一张勘误表。兰德公司的数学家们在修正一些随机的数字！他们发现了随机数中的随机错误吗？在很长一段时间里，我认为这是件滑稽的事情，但是后来再思索这件事时，它使我注意到这样一个重要的事实：即便是对数学家和科学家来说，“随机”一词也有着几种不同的意思。

我们前面一直在使用的“随机性”一词，比如用于一个有一千个比特的数串，它的意思是该比特串是不可压缩的。换句话说，它非常地不规则，以至于无法用更短的形式来表示它。但是我们也可以认为，该数串是由“随机过程”所产生的，也就是说，是由抛掷硬币这样的偶然过程所产生的，这里正面用 1 表示，反面用 0 表示。这两个意思并不完全一样。一千次抛币的一个结果可能是一千个正面，用二进制数表示即为一千个 1 组成的比特串。当然，这样一个一千次全是正面的结果不太可能存在。事实上，这种情况出现的概率是 $\frac{1}{2^n}$ ，其中 n 是一个有 300 来位数字的巨大的数。因为大多数长的比特串是不可压缩的（随机的）或几乎不可压缩的，所以许多组一千次抛币将得出随机的比

特串，但不是所有的各组实验都产生随机比特串。一个避免混淆的办法或许是，用“stochastic”（随机），而不是“random”来表示随机过程，而将“random”主要用于不可压缩的数串。

但是兰德公司随机数表中的随机是什么意思呢？这样一个表如何能配备一个勘误表呢？最重要的是，这个随机数表有什么用呢？

兰德公司物理部在 1956 年和 1957 年所开展的工作之一是一项非机密计划，该计划将应用于天体物理，它需要用相当基本的物理学进行计算。我承担了这一任务，另一个顾问，我的老朋友克斯·布吕克勒（Keith Brueckner）给我提供了一些帮助。部分计算涉及到几个非常困难的近似求和，兰德公司里一个很有趣的物理学家杰斯·马库姆（Jess Marcum）提出，通过一个称为蒙特卡罗的方法，利用随机数表来求和。

随机数和蒙特卡罗方法

这个方法很适合于杰斯，因为他不仅是个物理学家，还是个赌徒。早些年，他在玩 21 点牌游戏时赢了很多钱。他使用“学者方法”，在大部分情形下，当机会对他不利的时候，他就下小的赌注；而当机会对他有利的时候，例如，所有的十分牌（都是 10 和有花的牌）都在牌桌的某一部分，他就赌大的。这个方法仅当使用一副牌的时候管用。不久后，所有的赌场都改变了赌博规则（可以说是对“学者们”适应的结果），而开始同时使用好几副牌。杰斯于是转向其他方面的赌博。

有一次，他曾经向兰德公司请了好几个月的假，去赌赛马。他的方法是，对预测赛马胜负的人进行分析、推测。他不需要熟谙那些马本身，只需研究比赛形式，看每个预测者所预测的机会与实际情况符合的程度。然后他听从成功预测者的建议。但是，他还辅以另外一种方法。每次比赛开始前，他核对布告板，看定出的赔率（反映到那时为止所收赌注的多少）与好的预测者所预

言的是否相符。如果不相符，这就意味着参赌的人们在听从其他预测者的建议，或许就是那些名声不好的预测者的建议。杰斯瞅准最好的预测者所预言的赔率与布告板上所定赔率之间的这种差额，重重地下赌注。他用这种方式在赛马场稳稳当当地赚钱。但是不久之后，他总结出，在兰德公司他的薪水至少也有这么多，而且不必冒这么大的风险，因此他又回来工作了。这就是为什么我碰巧可以得到杰斯的帮助。

蒙特卡罗求和法用于对相当庞大的一组数的求和；它给出了一个从数字 1 计算第一个量，从数字 2 计算第二个量，从数字 3 计算第三个量等等的计算规则。该规则使得量的变换从一个数变到另一个数相当顺利；从相应的数字计算每一个量，既冗长又乏味，因此人们往往不愿多做这样的计算。（现在，由于有了极其迅速而功能全面的计算机，我们可以直接求这样的和，但是 35 年前的计算机需要有像蒙特卡罗方法这样的技巧，才能进行计算。）

假定我们要求 1 亿个量的和。在此之前我们先要从相应的数字，按从 1 到 1 亿的顺序进行，来计算每个待加量。为了应用蒙特卡罗近似法，我们使用随机数表来得到 1 与 1 亿之间随机选择的若干个数，不妨假设是 5000 个。5000 个数中的每一个，为 1 至 1 亿之间的任何数的概率是相同的。然后我们计算与这 5000 个数相对应的量，将这些量当作待加的 1 亿个量的代表性样本，并对它们求和。最后我们将所得结果乘以 1 亿被 5000 除所得的数（即 20,000）。用这个方法，我们以一个短得多的近似计算代替了原来冗长的计算。

真随机还是伪随机？

随机数表中应该是大于 1 而小于某个固定的大值的一组整数，每个数都是随机挑出来的，而且在挑选过程中，上述范围内的各个数都有同样的被挑选机会。实际上，随机数表通常不是这

么产生的，因而是一个伪随机数表！那些数是由计算机按照某个特定的数学规则迅速而容易地得出的，该规则非常地杂乱无章，所以整个过程被认为类似一个随机过程（例如，使用的规则从工程意义上来说可能是混沌性的）。然后，产生的数表可能被进行随机性检验，以确定它是否符合一个由真正的随机过程得出的数表在大多数情况下所应满足的统计标准。在兰德公司的表格里，那些数真是伪随机的吗？最后一刻的检验真的发现了某个统计标准未被完全满足吗？这就是为什么会出其不意地发现一个勘误表吗？这些问题的答案竟然都是否定的。毕竟，随机数表可以通过一个真正的随机过程，比如，一个利用量子力学现象的过程得到。事实上，兰德公司的数表就是通过使用真空管中产生的噪声这样一种随机方式来得到的。而且，勘误表是针对 100,000 个正常偏差数，而不是针对随机数表本身！如此具有教育意义的神秘现象原来一点也不神秘。然而，用随机方法需要作大量的工作，而利用决定论的规则则要方便得多。这只需让计算机迅速而容易地产生一个序列，并进而确保序列中多余的规律性在使用这些数的场合中相对来说没什么害处。可是，经验依然表明，将这样的伪随机序列当作随机序列使用，有时是很危险的。

最近我阅悉，许多实验室在使用一组极不随机的伪随机数。结果，用那些数字进行的某些计算出现了严重的错误。这个事件可以用来提醒我们，从决定论混沌或近混沌过程中产生数列具有相当程度的规律性。

金融市场中的决定论混沌

有时，被认为是随机的序列结果却是伪随机的。例如，多年来许多新古典主义经济学家一直都在鼓吹，金融市场上受市场基本原理控制的，价格围绕价值的涨落构成了一种称为“随机游动”的随机过程。同时，那些深谙价格随时间变化的曲线图的“图表专家”，可以在市场投资方面为你提供建议，他们声称能从

那些曲线中得到关于在不久的将来价格是上升还是下降的这样一些聊胜于无的预言。我曾经读到一位经济学家所写的一篇文章，作者在文章中对某些人主张使用这样的证据，而无视经济学家们关于价格涨落是随机过程的强调表示了强烈的愤慨之情。

但现在已有令人信服的证据表明，随机过程的观点是错误的。事实上，这些涨落与决定论混沌中的涨落一样，是伪随机的。理论上，他们包含有足够的规律性，使你可以从中赚钱。但并不是说那些图表分析家兜售的每一个金融方案都能让你发财；他们的建议可能多半是毫无价值的。不过，关于价格涨落不只是一个随机过程的观点本身，并不像那个愤怒的经济学家所认为的那样，是一种狂热的想法。（事实上，圣菲研究所的两个物理学家多依纳·法默（Doyle Farmer）和诺尔曼·派卡德（Norman Packard）已经停止了他们的科学研究工作，而去创办了一个投资公司。他们应用从决定论混沌及近混沌系统理论中得出的方法，来寻找金融市场中的规律，并由此进行投资。一开始，他们花了几个月的时间练习赌钱，然后开始利用一个大银行提供的资金进行真正的投资。迄今为止，他们干得相当不错。）

这里，我们已经遇到了关于“随机”一词的三种不同的专门用法：

1. 随机比特串是指该比特串非常不规则，从而找不到任何规律来压缩对它的描述。

2. 随机（random）过程是指偶然的或随机的（stochastic）过程。在产生具有给定长度的比特串时，它主要得出随机的、完全不可压缩的比特串；有时得出包含一定的规律性，因而具有一定程度的可压缩性的比特串；极少数情况下能够得到非常规则的、具有很大可压缩性的比特串，这些比特串一点也不随机。

3. 随机数表通常由伪随机过程——一个事实上没有利用偶然性的决定论计算过程——产生的，但它非常紊乱（比如混沌式的杂乱），所以在很多场合下同随机过程非常相似，并且满足一些真正的统计过程通常所满足的统计标准。当应用这样的伪随机

过程来产生比特串时，所得到的数串在相当大的程度上类似于一个真正的随机过程所产生的数串。

莎士比亚和著名的猴子

下面我们将要讨论，为什么算法随机性或算法信息量与我们对于复杂性的直觉概念不完全相符。现在我们看一个著名的例子，一个猴子站在打字机旁，假定它随机地敲击各个键，每次击键时，任何符号或空格键被敲击的可能性是相等的。我怀疑实际中的猴子是否会那么做，但对我们所要讨论的问题来说，这并不重要。问题是，在特定的时间内那些猴子打出莎士比亚著作（或大英博物馆中的所有书籍——博物馆的这一部分现在称为大英图书馆）的可能性有多大。显然，如果一定数量的猴子中每只打出足够多的页数，那么整个这些片断包含莎士比亚著作（不妨假设是佛里奥版本）中的一个连贯的段落的概率是非零的。然而，那个概率极小。即使全世界所有的猴子花一万年的时间，每天各打字8小时，打出的文章包含佛里奥版本的莎士比亚著作中一个连贯的部分的概率也是可以忽略不计的。

在鲁塞尔·马洛尼（Russell Maloney）几年前发表于《纽约人》杂志上的题为《不变的逻辑》（*Inflexible Logic*）一文中，作者虚构了这样一个故事：6个黑猩猩开始系统地用打字机打大英博物馆中的书籍，一本接一本，毫不犹豫，也不出错。但这些黑猩猩的结局却很悲惨：一个科学家为了维护自己的概率定律而将它们杀掉了。最后一只猩猩在一阵临死挣扎时，“猛然摔在它的打字机跟前。它痛苦地用自己的左手从打字机上拿下刚打完的，佛罗里欧（Florio）写的《蒙田》一书中的最后一页。它摸索着找到一张白纸，将它放入打字机里，然后用一个手指打着，‘《汤姆叔叔的小屋》（*Uncle Tom's Cabin*），哈里特·比切尔·斯陀著。第一章……’，然后它也死去了。”

考虑一只著名的非“纽约人”猴子，让它打一份与佛里奥版

本同样长的材料，将那只猴子的一个典型的成品与莎士比亚的著作进行比较。哪个具有更大的算法信息量呢？显然，猴子打出来的作品具有更大的 AIC。以随机过程（这里，随机是我们所给出的第二个意思）的方式，猴子极可能打出一个随机或近随机的符号序列（这里随机是第一个意思）。如果猴子的作品用某种标准方式编译成一个比特串，那么，在具有同样长度的比特串中，该比特串具有最大或近似最大算法随机性的可能性非常大。莎士比亚著作的随机性显然要小些。英语语法规则，拼写（纵然莎士比亚漫不经心地使用一个本来文法就不严的系统），合理性的需要及许多别的因素都使莎士比亚的文章具有一定的非随机性，从而使它比猴子所打的任何可能的、同样长的段落具有更低的算法信息量（或算法随机性）。对任何使用英语的作家来说也是如此；我们还没有考虑莎士比亚的独特性呢！

有效复杂性

很明显，尽管 AIC 或算法随机性有时被称为算法复杂性，但在大多数情况下它们与“复杂性”所指的意思没有多大的关系。为了定义有效复杂性，我们需要与在随机比特串中获得最大值的量截然不同的东西。事实上，正是系统或比特串的那些非随机性的方面，才促成了它的有效复杂性。有效复杂性，大致可以用对该系统或数串的规律性的简要描述长度来表示。原始复杂性与 AIC 不能表示我们通常所理解的“复杂性”，因为它们指的是对整个系统或数串的简要描述长度，其中包括它所有的随机特征，而不只是其规律性。

为了更加全面地讨论有效复杂性的概念，首先必须详细研究复杂适应系统的性质。我们将看到，除了一些别的东西之外，它们的学习或进化还要求有一定程度上识别随机性与规律性的能力。因而一个系统的有效复杂性，与正在观察该系统的复杂适应系统所作规律性描述有关。

第五章 儿童学习语言

我女儿学说话的时候，她最初说的几句话之一便是“爸爸坐车一车”(Daddy go car-car)，这是每天早晨我去工作时她都要说的话。这句话是关于我的，对此我感到受宠若惊，而且使我高兴的是，她真真实实地在说话，尽管她的英语还需要下一番功夫。只是在最近我才突然觉得，那句话中已经具有某些英语语法的特征。就拿语序来说吧，在英语中，主词总是位于动词之前(但在另一些语言，比如威尔士语、夏威夷语和马拉加西语中，就不是这样)。主词和动词的顺序是对的，词组“车一车”的位置也对了。在合乎文法的英语句子“[爸爸][驾车][走了]”([Daddy][is going away][in his car])中，三个要素与儿童的近似语言中的完全一样。

当我女儿逐渐长大时，她的语法自然而然地不断完善起来。像别的小孩一样，几年之内她就能说一口准确的英语了。只要有一个会说某种特定语言并定期对小孩说那种语言的照管人，比如父亲或母亲，那么，任何正常的儿童都会在几年的时间里学会正

确地说该种语言（当然，一些美国人认为这种说法不适用于美国的许多高中学生）。事实上，大多数小孩都能够像母语那样准确地掌握 2 至 3 种语言，尤其是当 2 个或 3 个照管人中的每一个，习惯上都只跟小孩正确地使用其中的一种语言的时候。即使小孩只通过一个人接触某种语言，情况也仍然如此。但是，对于某种给定的语言，小孩怎么知道哪些造句法合乎文法，哪些不合乎文法呢？

假设总共只有 5 万个可能的句子，母亲和孩子花上 1000 天的时间来系统地试验这些句子，每天检验 50 个新句子。每当小孩说一个句子，母亲就耐心地指出“好句”或“病句”。如果我们采用这样一个荒谬的方案，再加上小孩完美的记忆力，那么 3 年以后这个小孩就能准确地知道那 5 万个句子中哪些是合乎文法的。

计算机科学家可能会说，这个假想的小孩在心中建构了一个“查阅表”，上面列有每个候选的句子及它们的归类，即“合乎文法”还是“不合乎文法”。无疑，一个实际当中的小孩是不会准备这么一个表的。首先，5 万个句子太少了。

任何人类语言中，都有无限多个可能的句子，每个句子都可以包含任意多个子句，每个子句又可以包含多个修饰性字、词。句子长度只受到可利用的时间及说话者与听话者的耐心和记忆力的限制。而且，通常有数千个字可供我们使用。一个小孩不可能听到或试图说出每个可能的句子，并将它收入到查阅表中。可是在实际的学习过程之后，小孩却能够辨别出一个以前从未听到过的句子是否合乎文法。

儿童们必定会建构一套用于判断什么合乎文法及什么不合文法的临时规则，尽管他们并不是完全有意识地这么去做。然后，他们不断听到语法正确的句子，并偶尔发现一个病句后将它改正过来，他们不断地更改那套规则。同样，他们也未必是完全有意识地这么去做。例如，一个小孩可以很容易地掌握动词过去式的规则变化：加“d”或“ed”，然后，小孩偶然碰到“sing”和

“sang”（一个变化不规则的动词的现在时与过去式），于是他或她对那套规则进行修改，使之能包含这一例外情况。然而那套修改后的规则可能促使小孩说“bring”和“brang”，最终他或她得将它们修改为“bring”和“brought”。依此类推，逐渐地，这套内部规则不断得到改进。小孩正在心中建立起一种语法规则。

一个正在学习语言的小孩确实在使用着语法信息，这些信息是几年中从合乎文法的句子与病句的例子中得到的。但是小孩不会去建立一个查阅表，而是以某种方法将这些经验压缩成一套规则，一套即便是对以前从未遇到过的新句子也适用的内部语法。

但是只凭从外部世界，比如从父亲或母亲那儿获得的信息就足以使小孩建构这样一套内部语法吗？诺姆·乔姆斯基（Noam Chomsky）及他的门徒对这一问题给予了否定的回答。他们认为，小孩还必须天生就拥有大量适用于任何自然人类语言的语法信息。在生物进化过程中获得的，学说语言时具有某些语法特征的天生倾向，似乎是这种信息唯一可能的来源。这里所指的某些语法特征是所有自然人类语言共有的。每种语言亦包含一些非进化所得的附加特征。尽管有些附加特征可能像天生所具有的那些一样具有普遍性，但大部分都随语言的不同而不同。这些附加特征是儿童必须学会的。

语法作为一个部分图式

当然，一个陈述句是否合乎语法，多半与它陈述的内容是否属实无关。操英语者都知道，“绿色的天空中出现紫色和黄色的条纹。”这样一句话在语法上是正确的，尽管这种说法至少在地球上来看很不真实。但是，影响一个人在某个特定场合中选择某个合乎语法句子的，不只是真实性，还有许多其他的环境因素。

在建构内部语法时，小孩能够有效地区分开语法特征与他们听到的特殊句子的所有其他因素，这些因素有些是随机性的。只有这样，才能将散乱的语法特征压缩成一套容易使用的语法规

则。

一个这样做的小孩就显示出了复杂适应系统的第一个特征。他或她把从大量经验中识别出来的规律性的东西，压缩成一个图式，这个图式包含了支配那些经验的规则，但忽略了使用这些规则的特定环境。

然而，语法并不包含语言所具有的所有规律性。还存在发音规则（构成语言学家所称作的一种语言的“语音学”），语意学规则（关于什么合理，什么不合理），等等。因而语法图式不是关于一种语言的全套规则，语法也不是在语言数据流的随意性被去掉以后剩下的所有东西。然而，儿童对语法的掌握是建构一种图式——一种部分图式的极好的例子。

学习语言的过程也表现出在运作中复杂适应系统的其他特征。一个图式很容易发生变化，不同变异形式的采用与废弃，都要经过实践的检验。为了对它们进行检验，必须补充一些细节，比如在建立图式时所丢掉的那些。这是理所当然的，因为，在现实世界中将要遇到的，与最初从中提炼出图式的，是同一个数据流。最后，现实世界中发生的事情关系到图式中的哪个变异形式将幸存下来。

在掌握英语语法的过程中，图式是变化的，例如，用“ed”或“d”来构造动词过去式的规则，要被 sing - sang 与 bring - brang 之类的例外情形来修改。为了检验这些变异的规则，小孩必须将图式应用于一个实际的句子，从而重现建立图式时所忽略的那种特殊环境。例如，小孩可能说，“我们昨天上午唱了（sang）一首赞美诗。”这句话被认为是合理的。可是如果他或她说，“我带了（brang）一件东西回来给你们看”，那么他的父亲或母亲会回答，“你能让我看你从贝茜阿姨家捉到的蟑螂，我很高兴，但你应该说‘我带了（brought）一些东西回家……’”。这一经验可能促使该小孩试验出一个新的图式，它可以将 sing - sang 与 bring - brought 都包括在内。（当然，在很多情况下，小孩是等别人说话时来检验一个图式。）

复杂适应系统与有效复杂性

图 3—1 表示了一个复杂适应系统的运作情况。既然复杂适应系统从随机性中分离出规律性，从而得出一个图式来描述和预言新数据流的性质，那么，用图式的长度来定义复杂性也就成为可能。当然，那些数据通常和复杂适应系统正在观察的某个其他系统的运作有关。

利用一个图式的长度并不意味着回归到原始复杂性的概念，因为图式不能完备地描述被观察系统的数据流，而只能完备地描述从可利用的数据中提炼出来的规律。在某些情况下，比如语法情形，图式中只包含某种特定类型的规律，而其他规律则被弃置于一边，因此，这种图式是一种部分的图式。

你可以将语法复杂性看作一部语法教科书。大致说来，教科书越厚，相应的语法就越复杂。这与用图式长度来表示复杂性的思想是一致的。每一个引起困难的小小例外情形均使得书的厚度，也即语言的语法复杂性增加。

像通常情形一样，这里存在着诸如粗粒化和共同的初始知识或理解之类的随意性的来源。在语法教科书的情形中，粗粒化对应于教科书所达到的精细度。那么，一套语法如果遗漏了许多隐含规则与例外情况，而只包括不介意出错的旅游者所需的一些语法要点，能算是基本的语法吗？或者说，它能算是一部重要的学术书吗？如果是，那它是一种传统的常见的语法呢，还是刚流行的生成语法（generative grammar）呢？显然，书的厚度与这种区别有关。至于初始知识的层次，我们来考虑一部用英语为说英语者所写的成熟的外语语法。如果这是荷兰语（与英语非常相似且相近），而不是在结构上与英语很不相同的那佛乔语（Navajo）的话，我们就不必引入太多的新语法概念。而对那佛乔语来说，其语法规则应该更长些。类似地，一本写给说那佛乔语的人看的荷兰语语法书大抵要比写给说英语者看的荷兰语语法书更厚些。

即便存在着这些因素，将语言的语法复杂性与描述该语法的教科书的厚度联系在一起，也仍然是合理的。但是，如果有可能看到一个说母语的人的脑子（不断前进的科学技术也许会在某天使之成为可能），并看到语法在那里怎样被译成密码的话，那将更有意思一些。用那种内部语法所表示的图式的长度，可以作为衡量语法复杂性的尺度，这种衡量尺度具有较小的随意性。（自然，这种情况下长度的定义比较微妙，要依赖于语法信息在实际上被译成密码的方式。它们是储存在局部的神经元和神经突触上，还是以某种方式分布在整个神经网络中呢？）

我们将一个系统相对于正在对它进行观察的复杂适应系统的有效复杂性，定义为用来描述其规律性的图式的长度。当图式以某种方式支配被讨论的系统（比如储存于脑中的语法规规范着言辞），而不仅仅是被外部观察者，如一本语法教科书的作者使用时，我们就可以使用“内部有效复杂性”（internal effective complexity）这一术语。

从随机性中分离规律性

有效复杂性这一概念的作用，尤其当它不是内部有效复杂性时，与进行观察的复杂适应系统能否很好地识辨与压缩规律并抛弃偶然性的东西有关。如果不能，那么，特定观察者的缺点对被观察系统的有效复杂性的影响，比被观察系统本身的性质对它的影响更大。结果，观察者常常是相当有效的，但是有效性的概念却由此引起了深远的问题。我们已经知道，最理想的压缩思想可能会陷入不可计算性的困境之中。除压缩之外，实际的规律识辨又怎么样呢？从数据流中识辨规律性真是一个定义明确的问题吗？

如果从某种意义上说数据流无限地长，比如，在语言或教科书情形中，它如此地广博，以至于构成了一个包括用给定语言所能说出的每个可能的句子在内的典型样本，那么，识辨规律的任

务会更容易一些。这里，即便是一条罕见的语法规则，也会在相似的条件反复地显示出来，从而使人们能将它同纯偶然的不规则变化中得出的错误规则区分开来。（例如，在一篇短的英语文章中，过去完成时态可能不会出现，从而给人造成英语中不存在过去完成时态的错觉。而在一篇很长的文章中，这样的情况就不大可能发生。）

识辨某些类型的规律性

许多理论物理学家，如加利福尼亚大学伯克利分校和圣菲研究所的吉姆·克鲁奇菲尔德（Jim Crutchfield），在了解如何从一个无限长比特串的随机性中识辨出规律性方面，取得了很大的进展。他们定义了许多种规律性，并证明了在理论上如何应用计算机来识辨上述范围内的规律性。但是，即使他们的方法也不能提供一个挑出每种规律性的算法，这样的算法根本就不存在。但他们证明了，计算机在比特串中发现属于某类规律性后，能够推断出新的、属于一种更基本类型的规律性的存在，并知道如何识别它们。这被称为“分级学习”（hierarchical learning）。

通常，一类规律对应于一组关于如何产生一个数据流的数学模型。假设数据流是一个由随机（至少是部分随机）过程——不妨假设为掷硬币的过程所产生的一个比特串。这种模型一个很简单的例子，是一个有偏抛币序列（a sequence of biased coin tosses），其中出现正面（对应于比特串中的1）的概率是0和1之间的某个固定值，而出现反面（对应于比特串中的0）的概率是1减去出现正面的概率。

如果正面出现的概率是二分之一，那么这样一个序列中的任何表面的规律只能是偶然的结果。随着数据流变得越来越长，被这种偶然规律欺骗的可能性就越小，而认识到那一序列源自与无偏（unbiased coin tosses）抛币相似过程的可能性越来越大。考虑2比特数串这样一个极端情形。在无偏抛币情形中，2个比

特均为 1（一种完美的规则情形）的概率是四分之一。但这样一个序列同样有可能产生于抛掷两面均为头像（正面）的硬币的过程。因而，产生于无偏抛币过程的一个短比特串常常会被错误地当作一个有严重偏向性的序列。一般来说，一个无限长数据流的好处在于，它大大地增加了分辨各种模型的可能性，这里每个模型对应于一类特殊的规律性。

比有偏抛币序列稍稍复杂一点的另外一种模型，可能有这么个附加规定，即连续出现两个正面的序列应该抛弃。由此导致的规律性，即比特串决不会连续出现两个 1，在一个长比特串中可以很容易地辨认出来。一个更复杂的模型可能包含这样一些有偏抛币序列，其中任何一个连续出现偶数次正面的序列将被丢掉。

当一个复杂适应系统接收到一个任意长的数据流时，这里不妨设它具有比特串的形式，它能够系统地搜寻某给定类型的规律性；但是，没有可用于寻找所有各类型规律性的方法。任何被识别出来的规律性都可以进而被整合到一个用于描述数据流（或者产生该数据流的系统）的图式之中。

将数据流划分成若干部分——交互信息

在识别一个输入的数据流之中的规律性时，复杂适应系统通常将该数据流划分成具有某种可比性的许多部分，并研究它们之间的共同特征。许多部分所共有的信息称为“交互信息”（mutual information），它是规律性的特征。在用某种给定语言写出的一个文本流（a stream of text）情形中，句子可以作为待比较的各部分。各句的共同语法信息显示出语法规则。

然而，交互信息只用于识别规律性，它的量并不是有效复杂性的直接量度。在辨别出规律性并给出一个有关它们的概要描述时，那个描述的长度才是衡量有效复杂性的尺度。

大的有效复杂性与中等 AIC

假定所描述的系统根本没有规律性（比如那只著名的猴子所打出来的一段文字，通常就是——但并非都是——这种情形），一个正常运作的复杂适应系统也就不能发现什么图式，因为图式是对规律性的概述，而这里没有任何规律可言。换句话说，它的图式的长度是零，复杂适应系统将认为它所研究的系统是一堆乱七八糟的废物，其有效复杂性是零。这是完全正确的；胡言乱语的语法图式其长度应该是零。虽然在具有给定长度的比特串中，随机比特串的 AIC 最大，但是其有效复杂性却为零。

AIC 标度的另一个极端情形是，当它几乎等于零时，比特串完全规则，比如全由 1 组成。有效复杂性——用于描述这样一个比特串的规律性的图式的长度——应该非常接近于零，因为“全部为 1”的消息是如此之短。

因而，要想具有很大的有效复杂性，AIC 既不能太高，也不能太低。换句话说，系统既不能太有序，也不能太无序。

图 5—1 大致反映了系统（相对于作为观察者的正常运作的复杂适应系统）可能的最大有效复杂性随 AIC 变化的情况。从图上可以看出，它只能在极端有序与极端无序之间的中间区域达到最大值。在讨论简单性、复杂性和复杂适应系统的过程中所出现的许多重要量，都具有这样一个共同性质，即它们只可能在那个中间区域取得很大的值。

当一个复杂适应系统观察另一个系统，并且识别出它的一些规律性时，从被观察系统得到的数据流的 AIC 可以表示为如下两项的和：表观规则信息量与表观随机信息量。图式的长度——被观察系统的有效复杂性——实质上与表观规则信息量相等。对于一个被普遍认为是随机的数据流来说，其有效复杂性是零，整个 AIC 被认为是偶然性的结果。而一个被认为是完全规则的数据流（比如一个全部由 1 组成的长比特串）来说，整个 AIC 都是

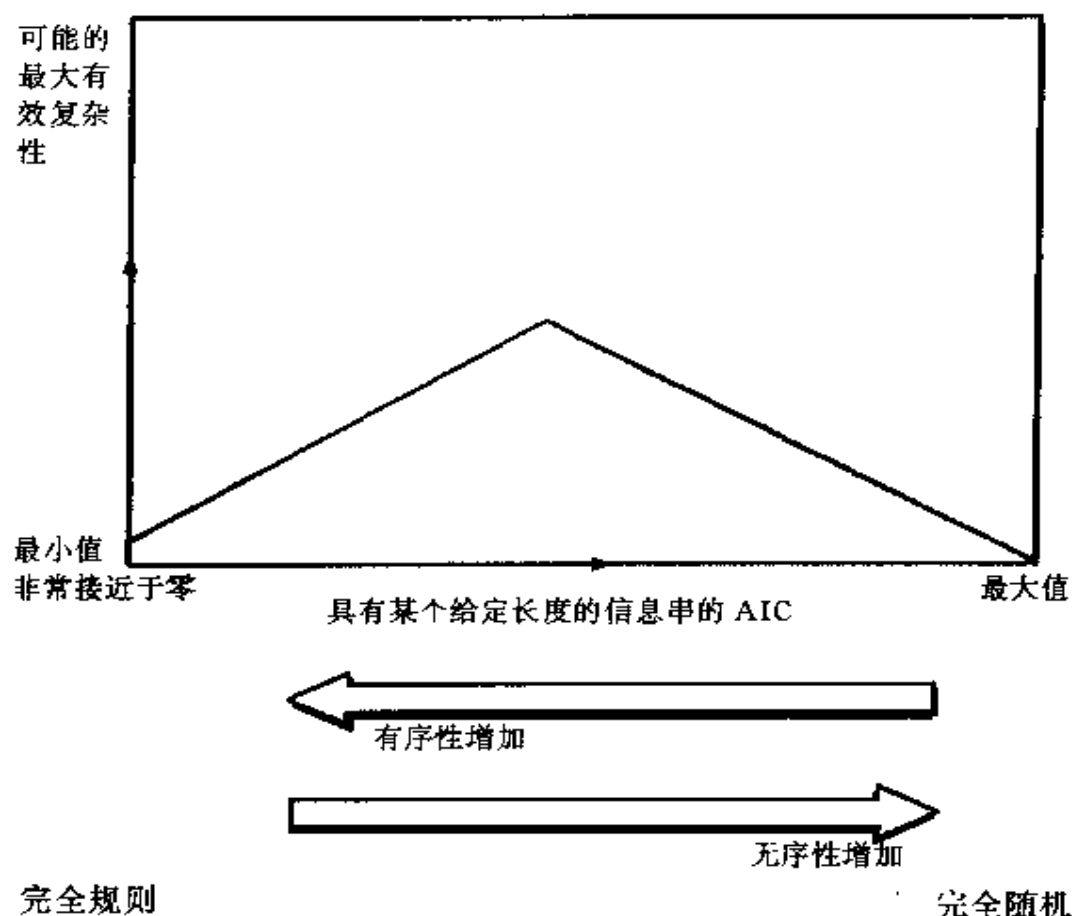


图 5-1

此略图大致表示了可能的最大有效复杂性随 AIC 变化的情况

规则信息量（没有随机信息量），但它的值非常地小。有趣的是，在这样两个极端情形之间，AIC 很大但不是最大（对于具有同一长度的数据流来说），并且等于两部分之和，即表观规则的部分（有效复杂性）与表观随机的部分之和。

通过基因或大脑学习

虽然我们对复杂适应系统的研究是从儿童学习的例子开始的，但是，说明这一概念并非必须借助如此高级的事物。用我们的同类猩猩——打字机故事中所描述的那种——同样可以。用狗也行。事实上，我们观察其他哺乳动物学习的一个办法就是通过

训练我们的宠物来进行。

教狗学会保持某种姿势牵涉到将一个抽象概念应用于大量各种各样的情况：在地上保持坐姿；车门打开时仍然呆在车中；呆在附近不动，而不去追赶一只迷人的松鼠。通过奖励和惩罚的方式，使狗学会应命令而处于各种状态的模式。其他可供选择的图式，比如将追赶猫当作例外情形的图式，随着训练的进行而被狗抛弃（至少理论上应是这样）。但即使狗选择了一种例外的图式，复杂适应系统也仍然在起着作用。这里，作为来自于训练过程和追猫天性之间竞争压力的结果，一个与训练者本意不同的图式幸存下来了。

在得到保持某种状态的命令后，受训的狗将适用于该特定情况的细节补充进来，并将图式应用于现实的行为世界，在那里存在着奖惩，这些奖惩最终有助于决定该图式是否幸存。尽管追捕松鼠或猫的倾向也影响各个图式之间的竞争，但它并非单个的狗所学得的。它而是作为生物进化的结果，并由遗传而获得的。

所有生物都有这样的本能行为。考虑一只为寻找食物而在巢穴周围漫游的蚂蚁。它遵循着一个经过数百万年的进化而得的内在的程序。卡耐基-梅隆大学（Carnegie-Mellon University）著名的心理学、经济学和计算机科学专家赫伯·西蒙（Herb Simon），很久之前曾用蚂蚁的行为来说明被我称之为有效复杂性的意义。蚂蚁所走的路径看起来很复杂，但寻觅过程的规则却很简单。蚂蚁所走的错综复杂的路径显示出很大的算法复杂性（AIC），但其中只有极小的一部分产生于规则。那些规则大致对应于寻觅过程的规律性。然而，那一极小部分的 AIC 却（至少近似地）构成了全部的有效复杂性。AIC 中剩下的部分，即大部分的表观复杂性，源于蚂蚁正在探寻食物的地域的偶然的、并多半是随机的特征。（最近，我同赫伯讨论蚂蚁的故事时，他笑着惊呼：“那只蚂蚁给我带来的好处真是太多了！”）

在级次越来越低的一组生物中，比如一只狗，一尾金鱼，一条虫子和一只变形虫，个体学习所起的作用越来越小，而通过生

物进化贮存下来的本能则起着越来越大的作用。但是，生物进化本身也可描述为一个复杂适应系统，即便是最低等生物的进化也是如此。

第六章 细菌产生耐药性

我在年轻的时候养成了翻阅百科全书的习惯（这个习惯一直延续至今，它给我的家庭带来了欢乐）。一次，我在一个栏目中偶然看到一篇关于铜腐蚀（bronze disease）的文章，它促使我开始思考一些后来成为本书主题的问题。

铜腐蚀是指能腐蚀铜表面，并产生一些不断扩展的浅绿-蓝色斑点的一组化学反应。在潮湿条件下，这些反应实际上能通过空气将腐蚀从一个表面传播到另一个表面，最后毁坏放在一起的所有铜制物。因为铜比较贵重，比如，每件中国商朝的铜器可能值一百万美元，所以保护铜制物免遭腐蚀就显得非常重要了。然而，当我作为一个穷家孩子面第一次读到这段记述时，显然不是从一个收藏家的角度来看待这一问题的。

我是在想，“铜腐蚀与由活生物导致瘟疫的区别在哪里呢？就在于铜腐蚀完全服从物理和化学规律吗？”即便是一个小孩，我也像几代以来的严肃科学家那样，拒绝接受这样一个观点，即生命以超越物理和化学之外的“活力”为特征。不，细菌同样也

服从物理和化学定律。那么，两者的区别到底是什么呢？我觉得，细菌（像所有其他有生命的物体那样）具有可遗传并服从自然选择规律的变异性，而对铜腐蚀来说，没有任何证据表明存在这样的性质。事实上，这种差别是判决性的。

为了进一步研究这种差别，我们来考虑管中流体的湍流现象。早在一个多世纪以前，人们就已经知道，能量耗散于从大旋涡变成越来越小的旋涡的过程。在描述那些旋涡时，物理学家常常引用斯威夫特（Jonathan Swift，英国作家）的诗：^{*}

学者观察惟仔细，
蚤身复有小蚤栖；
小蚤之血小蚤啖，
循环无穷不止息。

而且，物理学家、博学家理查森（L. F. Richardson）自己写了一首特别适用于旋涡的打油诗：

大旋涡中小旋涡，
高速向前奔驰过；
小旋涡里有更小，
直至粘滞再论说。

在某一意义说，较大的旋涡产生较小的旋涡。如果管子有弯曲和颈缩，就会使有一些大旋涡产生不了小旋涡，而另一些大旋涡则能够产生许多较小的旋涡，这些较小的旋涡还会产生更小的旋涡，依次类推。因此，旋涡似乎显示出一种变异性和选择性。然而没有人认为它们与生命物相似。那么湍流旋涡缺少生物所具

* 以下诗文引用张彦等译《混沌学——一门新科学》（社会文献出版社，1991年版）96页的译文。

有的哪些重要特征呢？湍流与生物进化的真正区别在哪里呢？

差别就在于，两种情形中对待信息的方式不同。在湍流中看不出有任何信息处理过程发生，也没有任何压缩规律性的迹象。但是，在生物进化中，由于过去的变异和自然选择而形成的经验，以高度压缩的信息束，即生物“基因组”（genome）的形式被传递给未来的后代。每个基因可有各种不同的形式，这些不同形式的基因位于同一种染色体的同一位置上，被称为“等位基因”（alleles）。包含一个生物中所有基因的特定等位基因组称为“基因型”（genotype）。

生物学家强调基因型与表型（phenotype）之间的差别，前者描述的是包含于生物个体基因中的遗传信息，后者描述的是生物在有生期间的外表和行为表现。当然，基因型的变化，比如某个基因从一个等位基因变到另一个等位基因，可以通过基因对生物体内化学过程的影响，从而进一步影响到表型。但是在生物的成长过程中，表型还受到大量其他环境因素的影响，而这些因素中很多又是随机的。想想从单细胞与胎儿过程到幼儿、儿童时期，再到具有生育能力的成年这一过程中，影响人类成长的所有偶然的环境因素就不难明白这一点。单个人体的基因型像一个基本的食谱，允许厨师在实际操作中有很多的变化。一个基因型允许个体在成长过程中成长为许多可能不同模式的成年人中的一个。在双胞胎的情形中，两人具有永远相同的基因型，这时两个具有不同模式的成年人将会共同存在。当把他们分开抚养时，他们在成人表型形成过程中，就能提供“天性”和“教育”所起作用的重要信息。

在生物进化的过程中，基因型在每一代中都会发生一些随机的变化。这些变化与某一代成长过程中发生的偶然事件一道，导致表型的变化。表型变化将有助于决定一个生物个体是否能够生存，是否能成熟，是否具有繁殖能力，以及是否能够全部或部分地将基因型传给自己的后代。因此，人口中基因型的分布是偶然性与自然选择的结果。

细菌耐药性的进化

对现代人类具有重要意义的一种生物进化的情形，是细菌耐抗生素的能力在不断发展。例如，在长期广泛地使用青霉素来控制某些病菌达几十年之后，出现了一些对青霉素不太敏感的细菌群体。为了对付由这些变异了的细菌所引起的疾病，必须有新型的抗生素，而在新药完善的过程中，很多人都得遭受病魔的折磨乃至死亡的命运。类似地，几十年来，人类研制的抗生素控制住了结核杆菌，但近年来它们之中已经形成了一些具有耐药性的种群。结核病又成了人类健康的主要威胁，尤其是在那些曾经将它控制住的地方。

两个细菌在它们靠近、融合，然后又分开的过程中所进行的遗传物质的交换，对细菌耐药性的获得常常起着重要的作用。这一过程是约什·莱德伯格（Josh Lederberg）在耶鲁大学读研究生时首次观察到的，它是像病菌那么简单的生物所能完成的有性接合过程。当时我是耶鲁大学的本科生，如今我依然记得，细菌领域“性特征”的发现当时曾引起公众多么大的关注；甚至《时代》周刊上都登出了这一消息。约什潜心于他的工作，这使他最终赢得了洛克菲勒大学的校长职位。为简单起见，在讨论细菌耐药性时，我将不考虑性的问题（这一点我得向约什表示歉意）。

因为同样的理由，我还打算忽略另一个重要机制，它是关于细胞之间遗传物质的交换，这里，交换过程的载体是使细菌受感染的病毒——噬菌体。这个过程的实验称为转导（transduction），是遗传工程研究开始的标志。

关于细菌的比较彻底的研究主要集中于大肠杆菌，这是人类肠道中一种普通的、无害的、甚至有益的细菌，但是当它感染到人体其他部分时，也能引发疾病（而且，它的某些突变形式即使是在消化道中也是有害的）。大肠杆菌是单细胞生物，其遗传物质由几千个基因组成。一个典型的基因是由大约一千个“核苷

酸”分子（统称为 DNA）构成的序列。DNA 是所有生物中所有基因的组成成分，它们共有四种，分别用每一种类的化学名称的第一个字母表示为 A、C、G、T。任何基因都是一个更长的核苷酸链中的一部分，而每个核苷酸链又与另一个核苷酸链一起形成双螺旋结构。双螺旋结构是克里克（Francis Crick）和沃森（James Watson）在富兰克林（Rosalind Franklin）和威尔金斯（Maurice Wilkins）工作的基础上，于 1953 年发现的。在大肠杆菌中，有两个呈螺旋状的核苷酸链，每个大约包含 500 万个核苷酸。

一条链上的核苷酸与另一条链上的核苷酸是互补的，即，A 与 T 彼此相对，而 G 则与 C 彼此相对。因为双螺旋结构的两条链中任何一条都可由另一条决定，所以我们只需审视其中一条链就能读到全部的信息。

假定核苷酸链中的核苷酸数目是 500 万。我们可以将 A 编码为 00，C 为 01，G 为 10，T 则为 11，这样，500 万个核苷酸就可以表示为一个由 0、1 组成的共有 1000 万个数字的数串，换句话说，也就是由 1000 万个比特组成的比特串，该比特串代表了每个大肠杆菌所要传给其后代的信息。大肠杆菌的后代是通过由一个细胞分裂成两个细胞的方式产生的，原来的双螺旋链变成了两个新的双螺旋链，分别属于两个新产生的细胞。

细菌的几千个基因中，每一个都可以有多种存在形式。当然，从数学上来看，其存在形式可以非常多，比如，对于具有 1000 个核苷酸的数串来说，可具有 4 的 1000 次方（ 4^{1000} ）种不同的组合形式。如果用十进制数来表示，这个数大约包含 600 个数字！但是自然界中能够发现的序列只是那些理论上可能的序列中一个极小的部分（如果它们全部存在，那将需要比宇宙中现有的多得多的元素）。实际上，在任何时候，每个基因都可能有这样几百种等位基因，它们在细菌家族中具有颇大的存在概率，并且具有不同的化学和生物效应。

在各种偶然事件的作用下，比如宇宙射线随机通过或环境中

强化学药品的存在，任何基因都可能发生从一种形式到另一种形式的突变。即便只有一个突变，也会引起细胞行为的变化，例如，一个大肠杆菌细胞中的某个基因突变成另外某个新的等位基因，那么理论上，这个突变可能致使那个细胞具有对某种药物，比如青霉素的耐药性。这种耐药性将随着细胞通过反复的细胞分裂进行繁殖而传递给后代。

突变通常是一些偶然的过程。假设一个细菌在宿主组织中繁殖出一个具有相同基因型的菌群，那么，不久之后，这个菌群将可能发生突变，而那些发生突变的细菌又会形成一个新的菌群。通过这种方式，该宿主组织中的细菌家族将包括各种不同的基因型。如果在宿主组织中注射足够剂量的青霉素，将只有那些对青霉素具有耐药性的菌群才能继续生存。重要的一点是，当药物开始施加对它们有利的选择压力时，耐药的突变细菌往往已经由于偶然性的原因而存在了，通常是因为它的某位祖先的突变遗传所致。即使它们没有呈现出来，但也在别的什么地方存在着，或至少它们经由偶然过程而不断形成，之后又消失了。如莱德伯格很久以前所证明的那样，突变不是由青霉素所引起的。

一个基因向对应于耐药性的等位基因的突变，可能对大肠杆菌细胞的运作有一些不利的影响。否则那个等位基因几乎必然无疑地存在于大量的大肠杆菌中，而一开始青霉素也不会产生抑菌作用。但是，随着青霉素继续被广泛地使用，外界条件对抗青霉素菌群的生存变得有利；与此同时，选择优势不论它们是什么，都不如耐药性这一优势重要。（一种应用不如青霉素普遍的抗生素可能更能说明问题，因为在注射药物之前，细菌与该抗生素的接触更少。）

因此，耐药性的发展是由于基因型的改变，这时大约有1000万个比特的信息串被细胞传递给后代。细菌是通过基因来“学习”对付这种对其生存造成威胁的药物的。但基因型还包含了大量其他信息，那些信息是细菌正常运作的基础。基因中包含了在数十亿年生物进化过程中所获得的如何生存的信息。

大肠杆菌及其祖先的原有生命形式的经验并不只是简单地被录制下来，形成一个可供参考的查阅表；而是把经验中的规律性识辨出来，并压缩成用基因型表示的信息串。一些规律还只是到最近，比如抗生素的普遍使用时，才被发觉到；大部分规律性则在很古老的时候就被发现了。在一定程度上，基因型随个体不同而有所不同（或随遗传学上完全相同个体的菌群的不同而不同），突变在任何时候都可能偶然地发生，并能被传递给后代。

这种学习方式与用大脑进行的学习之间存在着有趣的差别。我们已经强调过，当注入药物时，对该药表现出耐药性的细菌突变形式无疑由于偶然性而已经存在，而且无论如何那些突变形式过去曾不时地存在过。但是，对策更多的是应挑战而产生，而不是当挑战来临时就已经可以使用了。（某些不明显的证据表明，生物学上的基因突变有时应需要而产生，但是即使这一现象的确存在，那么与偶然性突变相比，它也是微不足道的。）

从复杂适应系统的角度来看待进化

进化过程可以在什么程度上被描述为一个复杂适应系统的行为呢？基因型满足图式的条件，它包含了高度压缩的历史经验，并且容易以突变的形式发生变异。基因型本身通常不直接接受经验的检验。它在很大程度上控制着生物的化学反应，但每一个体的最后命运还依赖于完全不受基因控制的周围环境条件。换句话说，表型由基因型和所有的外部条件共同决定，而其中的外部条件大多都是随机的。这种将图式展开，并利用输入的新数据，来对现实世界产生影响的过程是复杂适应系统的特征。

最终，一个单细胞生物的某个特定基因型幸存与否，取决于具有那种基因型的细胞是否能活到他们进行分裂，他们的后代是否也能活到进行分裂，等等，依此类推。这就满足了包括选择压力在内的反馈环路的要求。细菌群体无疑是复杂适应系统。

从图式的长度这一方面来说，细菌的有效复杂性显然与基因

组的长度有关。(如果 DNA 双螺旋的一些部分只不过是些堵塞物,不提供任何遗传信息,如像较高等的生物中存在的情形,那么这些部分的长度将不包括在内。)基因组中相关部分的长度提供了一个衡量有效复杂性粗略的内部尺度。说它是内部的,是因为它与生物用来描述将遗传物质传给后代的图式有关,而与外部观察者所设计的图式无关。(这一衡量尺度与一个正学习母语的小孩头脑中的内部语法长度相似,与之对应的外部图式则是一部描述该语言语法的书的厚度。)它只是一种粗略的量度,因为像其他复杂适应系统一样,生物进化在压缩规律性时,在不同的情形下有着不同的效率。有时这种差别可能使得该衡量尺度没有任何价值,比如在某些显然相当简单、但却具有异常冗长的基因组的生物中就是这样。

但是,不同生物的基因组之间的比较,暴露出了使用基于图式长度的有效复杂性,作为衡量一个物种复杂性的唯一尺度的想法是有缺陷的。例如,在考虑那些虽然细微但却很重要的差别,比如那些使人类有别于与其极相近的大猩猩的特点时,我们必须把一些更复杂的概念引进来。

相当少的几个遗传变化,可能促使一只类猿动物发展具有很大有效复杂性的语言、高深的思想及复杂的文化,那么这少数几个变化比遗传物质中大部分可比的错列,有更重要的意义。单靠用长度来衡量的新的(人类的)基因组的有效复杂性,并不能令人满意地描述相应的生物(人)的复杂性,因为发生了细微变化的基因组产生了很大的新型有效复杂性(文化复杂性)。

因此我们发现,有必要用“潜在复杂性”(potential complexity)来补充有效复杂性的不足。当图式中一个适度的变化可使复杂适应系统在某一特定时期内产生大量新的有效复杂性时,这个修改后的图式可以说大大地增加了关于那个时期的潜在复杂性的值。后面我们将要继续讨论这个问题,但现在我们还是回到作为一个复杂适应系统,细菌对药物的适应这一概念上来,并将那幅图景与一个关于这种耐药性的产生的错误理论进行比较。

直接适应

今天看来，耐药性如我们一直所讨论的那样，是通过一个遗传机制而形成的，这似乎是件显而易见的事。但是情况并不总是这样。40年代，当青霉素刚开始被使用，而磺胺类药物仍然是对付细菌感染的一个有力武器时，就已经存在着耐药性的问题了，关于它的形成，一些科学家提出了各种相差甚远的模型。其中有一位科学家是著名的英国化学家西里尔·欣谢尔伍德（Cyril Hinshelwood，后来被封为西里尔爵士）。我记得当学生的时候曾看过他的关于这一问题的著作，但即使是那时，我也很怀疑他对这一特定问题的观点。

欣谢尔伍德所提出的错误的耐药性理论自然是化学理论。他的书中到处都是描述化学反应情况的方程式。其中总的观点是，药物的存在致使细菌细胞的化学平衡发生不利于细胞繁殖的变化。但是，细菌长时间地接触大剂量的药物，将会以直接的化学方式导致细胞新陈代谢的调整，从而限制药物的不利影响，允许细胞继续生存与进行分裂。该理论断言，在细胞分裂中，这种简单形式的耐药性通过普通细胞物质的化学成分而机械地传递给子细胞。这其中的机制是由一组化学反应组成的直接负反馈。（如果你的汽车离开了路面，于是你转动方向盘将它矫正过来，这就是负反馈的另一个例子。）

在欣谢尔伍德的理论中，没有涉及到细菌的基因。也不存在作为耐药性发展之基础的复杂适应系统：没有信息压缩，没有图式，没有偶然的变异，也没有选择。事实上，该书中有一章专门批驳了有关自发变异的选择观点。

我们可以认为欣谢尔伍德的理论涉及“直接适应”（direct adaptation）。这样的过程非常普遍。考虑一个设置了某一特定温度的自动调温器；当外界温度低于设定的温度时，该装置将驱动加热系统，而当周围温度达到所设定的温度时，它又使加热系统

停止工作。自动调温器中没有一组竞争与进化的图式，而只有一个固定不变的程序。仪器只是不断对自己嘟哝，“太冷了，太冷了；有点热，太冷了……”，并据此采取行动。

将直接适应与复杂适应系统的运作作一个比较是非常有用的，但我并不是想借此表明直接适应没有什么意义。事实上，第二次世界大战后大部分关于控制论（cybernetics）的令人兴奋的事件，尤其是以负反馈方式使系统达到稳定这一过程，都与直接适应过程有关。其基本原则与自动调温器的一样，但它引出的问题更具有挑战性。

直接适应，专家系统及复杂适应系统

“控制论”一词是由麻省理工学院的一位伟大而又古怪的数学教授诺尔伯特·维纳（Norbert Wiener）首先采用的。维纳从小就被认为是智力超群的非凡人物。他从来没有克服掉以古怪的方式来夸大其辞的毛病。在麻省理工学院读研究生时，我不时发现他在楼梯上睡着了，他那肥胖的体态对过往的人们来说的确是个障碍。一次，他将头探进我的学位论文指导老师维基·韦斯科普夫（Viki Weisskopf）的房门，说了一些在维基看来完全不可理解的话。“噢，我还以为所有欧洲知识分子都懂汉语。”维纳说，然后就匆匆沿过道离去了。

“控制论”一词来源于古希腊语“kubernetes”，意思是舵手。它以希腊字母“k”起头，而“Øβk”这一名称中的“k”也具有同样的意思，这是一个学术荣誉学会，它的全名意思是“哲学，生活的舵手”。由希腊语借用到拉丁语，后来又由法语借用到英语中后，它产生了“控制”这一动词，事实上它与操纵和控制均有关，比如控制机器人。但是在控制论的早期时代，机器人通常不能通过感官意念来建立一个进化的图式。只是到了现在，我们才进入了一个真正是复杂适应系统的机器人时代。

就拿可移动的机器人来说吧。在早期它可能装备有传感器，

这些传感器能够感觉附近墙壁的存在，并刺激仪器使之产生相应的运动，避开墙壁。另外一些传感器可以探测近前地面上的凸起部分，并以某种预先决定的方式促使机器移动形式的改变，从而使之能够越过那些凸起部分。设计的宗旨就是提供一个对周围环境信号的直接反应。

接下来是“专家系统”（expert system）时代，在这一系统中，某一领域的人类专家将信息以一个“内部模型”的形式输入到计算机中，该“内部模型”可用来翻译输入的数据。用这种方法设计机器人所取得的成就并非是戏剧性的，我们可以用另一个不同领域的例子来说明这一方法。医学诊断可以通过医学专家的建议，在计算机中建构一个“决策树”（decision tree），从而在一定程度上实现自动化诊断。这里，“决策树”上的每一分支都有确定的、以与病人有关的数据为基础的决策来制定诊断规则。与复杂适应系统的图式不同，这样一个内部模型是固定不变的。计算机能够诊断疾病，但它不能从接连不断的诊断经验中，学得越来越多的诊断知识。它只是重复使用通过咨询专家而形成的同一个内部模型。

当然，还可以再向专家咨询，在此基础上重新设计内部模型，将计算机诊断的成功与失败考虑进去。这种情况下，包括计算机、模型设计者和专家在内的广延的系统可被当作一个“反馈回路中包括人”的人为复杂适应系统。

现在，我们正在进入一个计算机充当着不包括人类在内的复杂适应系统的新时期。许多将来的机器人将具有应变与选择的复杂图式。考虑一个有6条腿的可移动机器人，它的每条腿上有一套用来探测障碍物的传感器和一个信息处理器，这个信息处理器以某种预先安排好的方式对传感器输送的信息作出反应，从而控制该腿的运动，使它产生上、下或前、后的移动。这样的机器人腿与一组老式的控制装置相似。

如今这种设计还应该将各条腿之间的通信形式包括在内，但不是通过一个中央处理器的方式来实现，而是每条腿都能通过通

信联系的方式影响其他腿的行为。各条腿彼此之间的影响的强度模式都是一个图式，这个图式将根据外界变化，比如从伪随机数产生器输入的数的变化，而不断变化调整。影响某个待选图式的采用或放弃的选择压力，应该来自于附加传感器，它们是用来探测整个机器人而非仅仅是其中的一条腿所面临的情况，比如它是否在向前或向后移动，它的鼓出部分是否离地面足够高。用这个方法设计的机器人将能够发展这样一个图式，它可以让机器人根据穿越的地域给出适合的步法，并且能随地形的不同而发生变化。我们可以认为这样一个机器人至少是一种原始形式的复杂适应系统。

我听说，麻省理工学院研制出了一个跟这差不多的 6 腿机器人，而且它还显示出许多步法，其中之一是昆虫通常使用的一种步法：一边的前、后腿与另一边的中间的腿一起运动。该机器人何时使用这一步法，要视地形而定。

与学习少量关于其必经地域的有用性质的机器人不同，下面我们将要考虑的复杂适应系统不但要探究一个更宽阔的领域，即整个宇宙的大量细节特征，还要研究其一般特征。

第七章 科学活动

人类的科学活动是说明复杂适应系统概念的一个很完美的例子。图式即为科学理论，理论与观察之间的比较即为现实世界中所发生的事件。新理论必须与已有的理论进行竞争，部分地以自洽性和普遍性为基础，但最终还是要看它们是否能解释已有的观察结果，并正确地预言新的观察结果。每个理论都是对一类情况高度压缩的描述，它本身尚需要补充一个或多个情况的细节，才能作出某些特殊的预言。

理论在科学中的作用应当是相当显而易见的，但就我自己的情况来说，我是花了很长时间才真正感觉到这一点，尽管如此，我还是愿意将我的有生之年奉献给理论科学。在进入麻省理工学院的研究生院以后，我才终于认识到理论物理学是怎样运作的。

在耶鲁大学读本科时，我在科学与数学课程方面都取得了好成绩，但我并不总是明白所学知识的意义。在多数情况下，似乎只是在考试时将课堂上老师所教的东西回忆出来。当我参加了一期哈佛-麻省理论讨论班以后，我的观点发生了改变。我本来以

为，所谓的讨论班只不过是某种课的美名而已。但事实上，它根本不是一门课，而是关于理论物理，特别是原子核和基本粒子物理方面真正的讨论。参加者包括来自两所大学的教授、博士后和研究生；每次先由一个理论家发表演讲，然后大家就他所提出的论题进行广泛的讨论。我没能彻底赏识这种科学活动，因为我的思维方式依然受着课程和分数以及取悦老师的观念所限制。

那次演讲的是哈佛大学的一个研究生。他刚刚完成博士论文，这论文讨论的是由 5 个质子和 5 个中子组成的¹⁰硼 (¹⁰B) 核的最低能态的特点。通过一个看似很有希望，实则不一定管用的近似方法，他判定，最低能态应该具有一个量子单位的“自旋”角动量。物理学家们一般也是这么认为的。当他讲完后，我极想知道，他通过近似方法得到预期的结果，以及坐在前排的杰出理论物理学家们对此有何评论。然而，第一个发言的根本不是理论物理学家，而是一个满脸胡子、好像刚从 MIT 的地下室中爬出来的小个子人。他说，“喂，它的自旋角动量不止一个量子单位，是 3 个量子单位。我检测过！”蓦地，我明白了理论物理学家的主要目标：不是积极地说服前排的教授们，而是要与观察结果一致。（当然，实验物理学家们也可能出错；但在上述情况下，那个邋遢人所提到的观察结果是正确的。）

我为自己早先没能完全懂得科学活动以何种方式进行而感到惭愧。根据是否与实验结果一致这一标准（当然还有它们的自洽性与普遍性）来选择理论的过程，与根据是否能产生可繁殖的生物这一准则而选择基因模式的生物进化过程，并非完全不同。但直到很多年以后，当我更加了解简单性与复杂性以及复杂适应系统时，我才完全重视这两种过程的相似之处。

现在大多数物理学家要么是理论家，要么是实验家。有时是理论家走在前面，他们提出一个相当成功的理论体系，该体系能够作出可反复为观察所证实的预言；另外一些时候则是实验家先行一步，他们发现一个意外的结果，这时理论家们必须对它进行分析讨论。但是这样两种不同类型的研究者的存在并非理所当

然。物理学领域并不总是这样，而且在其他很多领域——包括文化人类学，考古学和大部分的生物学——中，只有少数专职理论科学家，而且他们未必很受尊敬。在如今享有很高声誉的分子生物学学科中，大部分理论难题都被实验家们相当容易地解决了。结果，许多杰出的分子生物学家都没有强烈地感觉到生物学中需要理论家。

与之形成对比的是，群体生物学有着悠久而光荣的数学理论的传统，这在罗纳德·费希尔爵士（Sir Ronald Fisher）、J.B.S. 霍尔丹（J.B.S. Haldane）和塞瓦·赖特（Sewall Wright）这样一些著名人物中得到了充分的体现。通过他们和其他许多理论家们的工作，无数详细的预言被作出，并且被群体遗传学中的观察结果所证实，甚至数学著作也因之得到了充实。

随着一门科学的成熟及理论方法之深度与威力的增加，理论逐渐成为一种职业。但是，不管是否存在两种活动的不同从业者，理论与观察的作用应该是有区别的。让我们看看两者的相互作用怎样构成复杂适应系统的运作。

理论通常是从大量的观察结果中得出的。在观察过程中，科学家们有意识地从麦壳中挑拣出麦粒，从特殊或偶然的事件中找出规律来。我们通常用一个很短的信息将理论表述成为一个或一组简单的原理。如斯特芬·沃尔夫兰（Stephen Wolfram）所强调的那样，理论是一个可用于很多情况的压缩信息束。一般说来，存在很多种竞争着的理论，其中每个都具有这样的特点。为了对某一特定情形作出预言，每个理论都必须被重新展开，说得更确切些，我们必须给构成理论的那个压缩的一般性陈述，补充一些关于该特殊情形的详细信息。从而可以通过实验进行进一步的观察来检验理论。在对那些观察结果进行预言时，相互竞争的各个理论表现的好坏，将有助于决定它是否能幸存下来。与经过精心构思的实验（特别是那些被重复多次并具有相同结果的实验）的结果很不一致的理论，多半都要被更好的理论所代替，而那些成功地预言与解释观察结果的理论容易被接受，并被当作创立后续

理论的基础，只要它们经得起后续观察结果的考验。

可证伪性和悬而未决

哲学家们，特别是卡尔·波普尔（Karl Popper），常常强调，科学的基本特征在于它的理论是可证伪的。科学家根据理论作出预言，然后进一步的观察将证实那些预言。当一个理论与一些反复多次直到值得接受的观察相抵触时，该理论肯定会被认为是错的。一个观点失败的可能性总是存在的；这就给所有科学活动蒙上了一层悬而未决的色彩。

有时证明或证伪一个理论需要经过很长的时间，以至于理论的提出者在死时还不知道他或她所提出的观点的命运如何。最近几十年内研究基础物理学的科学家们，在有生之年幸运地看到了我们的理论观点得到检验。当一个人在得知其预言实际上被证实，而作为其基础的新的理论方案基本正确时，那种激动之情是难以言传的，可以说，是盖帽了。

人们常常说，理论即使与新的证据相抵触，也只会它们在它们的支持者都死去后才会消逝。虽然这一评论是针对物理学的，但我觉得，如果说它具有普适性的话，那么对于困难而复杂的生命科学与行为科学来说更加如此。我的第一个妻子玛格丽特是研究经典考古学的，50年代她发现上述观点也适用于她的领域。但她惊讶地发现，当许多物理学家所喜爱的观点面临相抵触的证据时，他们实际上改变了他们的主意。

当一个特殊领域看来似乎缺少悬念时，可能会爆发一场关于它是否真是科学的争议。人们经常批评精神分析的不可证伪性。这一点我比较同意。这里我将精神分析指定为这样一个理论，它描述人类行为怎样受到无意识心理过程的影响，以及那些心理过程自身怎样由经历（特别是早期的经历）而引起的。（我不打算讨论治疗方法这一与本文完全不相关的问题。疗法之所以管用，可能是因为在分析者与接受分析者之间建立了积极的关系，因而

并不能证实任何精神分析的观点。同样，即使那些观点中有许多是正确的，治疗也仍然可能无效。)

我相信通过精神分析而形成的知识体系中存在许多真理，但它现在不能构成一门科学，因为它不具有可证伪性。由一个病人所作出的陈述或所表露的行为中，与精神分析的基本观点有某些不一致的吗？如果有，那么那些观点就不能真正成为一个科学理论。

我的思绪不禁飞回到 60 年代，当时我打算从理论物理学转到观察心理学或精神病学方面去。我想将一小组可证伪因而能够成为理论的精神分析观点分离出来，然后寻找可以检验这样一个理论的方法。(这组观点可能与某个特定的精神分析学派的观点不完全一致，但它们至少很接近于一般的精神分析观点。这些观点不但涉及到无意识心理过程对神经病患者所表现出来的反复的、明显不适应的行为模式中所起的作用，而且还论及这种心理过程在正常人日常生活中起的作用。)

在几个月的时间里我拜访了许多杰出的精神分析学家与理论心理学家（那时他们依然受着行为主义的强烈影响——认知心理学还处在初期）。但他们都使我感到很沮丧，虽然两方面的原因相反。许多心理学家倾向于认为，无意识的心理过程不重要，或难于研究，或兼而有之，而且他们认为精神分析非常可笑，不值得去认真地考虑；精神分析家们则觉得，他们的学科已经为大家接受，勿需费心将其中的一些观点纳入科学的框架之中，精炼其操作方法所需的任何探索，都应该由精神分析家们各自在同病人打交道的过程中进行。最后我打消了改行的念头，继续研究物理学。但多年以后，我得以有机会重新尝试这一努力，即试图将某些关于意识与无意识心理过程及其对行为模式的影响的观点纳入到科学的框架当中。

科学活动的选择压力

实际上，科学活动并不严格按照任何明确的模型进行。理论上，科学家们做实验要么是试探性地，要么是为了验证重要的理论方案。他们应该依据对实验数据的描述之正确性、普遍性与自洽性的程度来评断一个理论。他们不应该表现出诸如自私、不诚实与偏见之类的行为。

但是，从事科学工作的人们毕竟是人。他不可避免地要受到自负、经济私利、个人方式、信念与惰性等的影晌。一个科学家可能试图剽窃，或为了私利而有意发起一项毫无价值的计划，或姑且承认一个传统的观点而不去寻找一个更好的解释。还会时常发生这样一些事情，科学家们甚至修改他们的实验数据，犯下了他们职业领域内最严重的禁忌之一。

不过尽管如此，科学哲学家、科学史家或科学社会学家们，仍不时抓住科学活动中存在的这些美中不足之处来责难整个科学活动，说整个科学活动错误百出，极不可靠，这也仍然是不中肯的。他们没能懂得科学的主旨。科学活动的本性就使它具有自动修正性，并且能够克服种种弊端，向正确方向前进。像聚水（polywater）或冷聚变（cold fusion）这些过分的、没有事实根据的声言，很快就被推翻了；像皮尔丹人（Piltdown man）^{*}那样的恶作剧最终总会被识破。偏见，比如反对相对论的那些偏见，终会被克服。

一个研究复杂适应系统的学者可能会说，在科学工作中，不但存在着作为科学特征的选择压力，还存在着通常出现于一般人类事务中的常见的选择压力。但是特有的科学选择压力在促进人类对自然的理解方面起着决定性的作用。反复进行的观察与计算

* 1912年在英国萨克斯郡的 Piltdown 发现所谓洪积世最古人类头盖骨，结果到 1953 年被证明是伪造赝品——译者注

(及两者之间的比较), 最终会去除由于其他压力所引起的瑕疵 (即从科学的观点看来不完善的特征。)

任何一个科学发现的历史细节通常都有点混乱, 但最后结果却可以既辉煌又明了。比如对一个统一理论的阐述与验证就是这样。

统一与综合的理论

有时一个理论实现了一次重大的综合, 它将原来被分开地、不充分地描述的一整组现象中发现的规律压缩成一个简单而优美的论断。基本物理学中一个绝妙的例子是麦克斯韦 (J. C. Maxwell) 在 19 世纪的 50 和 60 年代所做的关于电磁理论的工作。

很早以前, 人们就对某些简单的静电现象很熟悉, 比如, 他们知道刚与猫皮摩擦过的琥珀 (希腊文中为 *elektron*) 能够吸引羽毛残片。同样, 他们了解磁的某些性质, 比如他们知道, 磁铁矿 (以盛产磁铁矿的小亚细亚的玛格尼西亚 (Magnesia) 命名的三氧化二铁) 能够吸引小铁块, 而且可以将小铁块也磁化, 使它们也能吸引别的小铁块。近代科学家吉尔伯特 (W. Gilbert) 在他 1600 年撰写的关于磁的著名论文中引入了一些重要的电学观察结果。但当时电和磁依然被认为是两种不同类型的现象; 直到 19 世纪, 人们才明白, 它们之间有着密切的联系。

1800 年左右, 伏打 (A. Volta) 发明了第一个电池 (伏打堆), 这使得电流的实验成为可能, 从而为发现电与磁之间的相互作用打开了大门。大约在 1820 年, 奥斯特 (H. C. Oersted) 发现金属丝中的电流产生环绕金属丝的磁场以后, 电磁学这门学科正式诞生了。1831 年, 迈克尔·法拉第 (M. Faraday) 发现, 变化的磁场能在金属回路中产生感应电流; 这一效应后来被解释为随时间变化的磁场产生电场。

到 19 世纪 50 年代, 当麦克斯韦开始着手对电磁效应进行综

合的数学描述时，电磁学领域中的单个问题大部分已被阐述成科学定律。麦克斯韦所做的就是写出一组重现那些定律的方程，如下图所示的那样。在当前的大学校教科书中，它们通常被表述成 4 个方程。第一个方程重新陈述了用来描述电荷怎样产生电场的库仑定律；第二个方程则体现了安培的一个猜测，即不存在真正的

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = 4\pi\rho \quad (1)$$

利用与当今大学教科书中相类似的符号表示为：

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (2)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} + \frac{1}{c} \dot{\mathbf{B}} = 0 \quad (3)$$

$$\nabla \times \mathbf{B} - \frac{1}{c} \dot{\mathbf{E}} = \frac{4\pi}{c} \mathbf{j} \quad (4)$$

$$\frac{\partial E_x}{\partial x} + \frac{\partial E_y}{\partial y} + \frac{\partial E_z}{\partial z} = 4\pi\rho \quad (1)$$

$$\frac{\partial B_x}{\partial x} + \frac{\partial B_y}{\partial y} + \frac{\partial B_z}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

用类似于麦克斯韦开始研究时所使用的不那么压缩的符号表示为：

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial E_x}{\partial x} - \frac{\partial E_y}{\partial y} + \frac{1}{c} \dot{B}_z &= 0 \\ \frac{\partial E_y}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial y} + \frac{1}{c} \dot{B}_x &= 0 \\ \frac{\partial E_z}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial z} + \frac{1}{c} \dot{B}_y &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial B_x}{\partial y} - \frac{\partial B_y}{\partial x} - \frac{1}{c} \dot{E}_z &= \frac{4\pi}{c} j_z \\ \frac{\partial B_y}{\partial z} - \frac{\partial B_z}{\partial y} - \frac{1}{c} \dot{E}_x &= \frac{4\pi}{c} j_x \\ \frac{\partial B_z}{\partial x} - \frac{\partial B_x}{\partial z} - \frac{1}{c} \dot{E}_y &= \frac{4\pi}{c} j_y \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

用更加压缩的相对论符号表示为：

$$\partial_\nu F^{\mu\nu} = \frac{4\pi}{c} j^\mu \quad (1 \text{ 和 } 4)$$

$$\epsilon^{\mu\nu\kappa\lambda} \partial_\nu F_{\kappa\lambda} = 0 \quad (2 \text{ 和 } 3)$$

图 7-1 麦克斯韦方程的三种写法

磁荷（因而所有磁性都可归因于电流）；第三个方程重述了法拉第定律，描述变化的磁场怎样产生电场；第四个方程，如麦克斯韦最初所写的那样，只不过是重现安培定律，描述电流怎样产生磁场。当麦克斯韦思考他的4个方程时，他察觉到其中有错误的东西，他认为第四个方程有错，并对它作了修正。当时他所用的推理过程在我们今天看来很不明确，不过经过修改的形式引起了现代人们的兴趣，它清楚地显示出需要什么样的变革。

总电荷守恒（不随时间而变）是一个优美而简单的定律，已通过实验的检验而被人们普遍接受，在麦克斯韦的时代它已经是一个重要原理。但是，麦克斯韦原来的方程与这一原理之间存在着冲突。作怎样的改动才能使它们服从这一守恒原理呢？第三个方程中有一项是描述变化磁场产生电场的。为什么不能在第四个方程中引入相应的一项，用以描述变化电场产生磁场呢？的确，如果新项中的系数取某个特定的值，这个方程就与电荷守恒原理一致了。而且，该系数的值很小，麦克斯韦可以放心地将它加到新项中而不会使之与任何已有实验的结果相抵触。加入新的“位移电流”项后，麦克斯韦方程就变得完备了。电学与磁学通过这一对电磁现象的优美而自洽的描述方式，完全统一起来了。

我们现在可以来探究这个新描述所产生的结果了。物理学家很快发现，引入新项后的方程组具有“波动解”——通过加速电荷的方法而产生各种频率的电磁波，而且频率的值可以计算出来。在真空中，所有的波都将以同样的速度进行传播。通过计算，麦克斯韦发现那个速度在有效的误差范围内与著名的光速，约186 000英里/秒，完全相同。光是由某一频率范围的电磁波组成的吗？以前法拉第也曾以一种模糊的形式作过这一推测，但在麦克斯韦的工作中，它具有了更大的明晰性与似真性。这个观点是完全正确的，虽然过了很多年它才被实验所证明。麦克斯韦方程还预言了频率高于可见光范围的波（我们现在所称作的紫外线、X射线等等）和频率低于可见光范围的波（我们现在所称作的红外线、微波、无线电波等等）的存在。后来，所有那些电磁

辐射形式都被实验发现了，这不仅证明了该统一理论，而且还导致技术上一系列惊人的成就，这些成就是我们大家有目共睹的。

大统一理论的简单性

麦克斯韦方程以简单的几行描述了整个宇宙中的电磁现象。(到底是几行则如图 7—1 所示，要视所使用符号的紧凑性而定。)给出电荷、电流与边界条件，就能计算电场和磁场。这个方程组概括了电磁学的普遍性质——只需补充一些特殊的细节。方程组准确地识别出电磁规律，并将它们压缩成为一个极小但威力无穷的数学包。还有什么图式比这更优美呢？

因为这一图式的长度几乎是零，因此按我们的定义，有效复杂性也趋于零。换句话说，电磁学定律相当简单。

批评家可能会抱怨说，麦克斯韦方程的确很短，但是要理解表示这些方程的符号却需要一定的知识。麦克斯韦最初发表这些方程时，他的表达方式就不如当今大学课本上所用的简洁，他给出的那组方程略长了些。相应地，我们现在可通过使用一套相对论符号来使它们更加简化（较长与较短的两种叙述方式都已在图上表示出来）。批评家可能会要求我们，在每种情形下，我们的图式不但要包含这些方程，而且还要将表示符的说明包括进去。

这并不是不合情理的要求。我们在讨论原始复杂性时已经说过，为了减小描述长度而使用特殊的语言会使人产生错觉。事实上，麦克斯韦方程的数学基础解释起来也并不很难，但即便情况不是这样，我们所需要的也只是有限数量的说明。而当我们考虑到这些方程适用于宇宙中所有的电场和磁场时，这种瑕疵也就微不足道了。所实现的压缩依然是巨大的。

万有引力——牛顿和爱因斯坦

另一个值得注意的普适定律是引力定律。伊萨克·牛顿 (Is-

sac Newton) 首先提出了第一种形式, 两个半世纪之后, 阿耳伯特·爱因斯坦将它发展成为更加准确的广义相对论性引力理论。

当牛顿还是个 23 岁的年轻人时, 他就显示出洞察引力普适性的能力。1665 年, 由于瘟疫的流行, 剑桥大学被迫停课, 当时刚获学士学位的牛顿回到他的家乡林肯郡沃尔斯索普。从 1665 年至 1666 年, 他在那里开始发展引力定律、三大运动定律及微积分学。此外, 他还做了著名的棱镜实验, 证明白光与虹的颜色成分相同。这些工作中的每一项都是一个较大的革新, 而且尽管科学史家们现今喜欢强调说, 牛顿并不是在一个奇异之年中完成所有这些工作的, 但他们依然承认, 在那个时期, 各项工作都有了良好的开端。就像我妻子玛希娅(她是一位诗人)所爱说的, 他可能写过一篇题为“假期中我所做的工作”的随笔。

传说中, 牛顿是受到苹果落地的启发而得出万有引力定律的。确有这样的偶然事件吗? 科学史家们没有掌握确凿证据, 但他们也没有排除这种可能性, 因为关于这件事有 4 个独立的出处。其中康杜伊特(Conduitt)这样写道:

1666 年, 他再次离开剑桥……回到林肯郡他母亲那儿。当他正在花园里沉思冥想的时候, 他突然觉得, (使苹果从树上掉到地上的) 引力作用, 其适用范围不应只局限于离地球某个特定距离以内, 而是应该扩展到比我们通常想象的远得多的距离。他自言自语地说, 为什么不能扩展到月亮这么远的距离呢? 如果能, 那么引力一定会影响她的运动, 这也许正是使她留在其轨道上的原因。于是, 他开始进行计算, 看那个猜想将会产生什么结果, 这种计算是书上没有的。他采用诺尔伍德(Norwood)测量地球之前在地理学家与海员中普遍使用的估计值, 即地球表面上每个纬度包含 60 英里。他的计算结果与预期的不一致, 这使他倾向于抱这样的想法, 即除引力之外, 可能还存在着一种混合力, 这种混合力是月亮作涡动时所具有的……

从这个故事中我们看到，一些在理论科学家的生活中时常出现的过程，可能对他产生影响。一个思想常常在奇怪的时候突然来临，它使原来被认为不相干的两组现象产生联系，于是一个理论就这样被发现了。它的一些结果可以被预言；在物理学中，理论物理学家为了作出那些预言要“进行计算”。即便理论是正确的，那些预言也仍有可能与观察结果不一致，要么因为观察报告的结果有误（比如牛顿的情况），要么因为理论物理学家在应用该理论时出了数学或概念性的错误。于是理论物理学家可能对本来正确（并且优美而简单）的理论进行修改，补缀出一个复杂一些的理论，使之能包容所出现的错误。看康杜伊特上述引文的最后几句中提到的，牛顿想附加到引力中的那个混乱的“涡动力”！

很久之后，理论与观察结果之间的矛盾被消除了，牛顿的万有引力理论被人们接受，直到 1915 年左右才被爱因斯坦的广义相对论所代替，后者在所有物体的运动速度远远小于光速的极限情形下与牛顿定律严格一致。在太阳系中，行星与卫星的运动速度在每秒 10 英里左右，而光速约为每秒 186,000 英里。因此，爱因斯坦对牛顿理论的修正非常小，迄今为止只能在为数不多的一些观察中探测到。在所有已经进行的实验中，爱因斯坦的理论都被证明是正确的。

托马斯·库恩（Thomas Kuhn）在他写的《科学革命的结构》（*The Structure of Scientific Revolution*）一书中，以一种特别的方式描述了这种情况，即一个优美的理论被一个更好的理论所代替。库恩的观点现在在科学哲学界很有影响，他特别注意“范式的改变”，这里的“范式”（paradigm）具有相当特殊的意义（有的人可能说他在滥用这个词！）。他的方法强调新理论接替旧理论时原理方面的变化。

在引力情况下，库恩指的可能是这样一个事实，即牛顿理论应用了“超距作用”，也就是瞬时作用的引力，而在爱因斯坦理

论中，引力作用与电磁感应一样，以光速向远处传播。在牛顿的非相对论理论中，空间和时间是独立的、绝对的，引力与几何学没有关系；而在爱因斯坦理论中，空间与时间联系到了一起（在相对论物理学中总是这样）。可以认为，爱因斯坦引力与空-时几何有着密切的关系。而且，与牛顿引力不同，广义相对论建立在等效原理的基础上，它指出，不可能将引力场与所处的加速参照系区分开来（比如在电梯中）；人们能感觉或测得的是自身的加速度与当地引力加速度之间的差量。

范式改变法关注的是新旧理论在哲学与语言方面的这样一些深刻差别。库恩不喜欢强调（当然他还是提及）这样的事实，即旧理论在其发展的范围以内（在引力情况下为低速范围内）依然能够提供相当好的近似计算与预言。这里，我愿意特别提请大家注意这一特征，因为我要指出如下事实，即，在科学活动的图式竞争中，一个图式对另一个图式的胜利未必意味着失败者被抛弃和被遗忘。事实上，失败者甚至比那更准确和高级的胜利者使用得更频繁。太阳系的牛顿力学与爱因斯坦力学之间的情形无疑就是这样。科学理论竞争中的胜利与其说是个失败者被摒弃的问题，不如说是旧理论的降级与新理论的升级。（当然，这样的情况也时常发生，即旧理论不再有任何价值，而主要只有科学史家们不厌其烦地去讨论它。）

爱因斯坦的广义相对论方程

$$G_{\mu\nu} = 8\pi\kappa\tau_{\mu\nu}$$

对引力所起的作用与麦克斯韦方程对电磁学所起的作用相似。方程的左边与时空的弯曲（从而与引力场）有关，右边与不同于引力场的物质之能量密度等有关。它以一个很短的公式表示了整个宇宙引力场的普适特征。只要给出物质的质量、位置和速度，就能计算出任何地点与时刻的引力场（进而得出引力对试验物体运动的影响）。我们这里所讨论的是一个威力无比的图式，它将各处引力的普遍性质压缩成一个简短的信息。

同样，批评家可能会要求，我们的图式不仅应包含那个公

式，还应包括一个对所用符号的说明。我父亲曾试图弄懂爱因斯坦理论，作为一个有学识的门外汉，他过去常说，“你看这个理论多么地优美与简单，可 $\tau_{\mu\nu}$ 和 $G_{\mu\nu}$ 是什么呢？”如在电磁学情形中一样，即便把学习的过程加到图式中，从压缩程度来看爱因斯坦方程也依然是相当简单的，因为它描述了所有各处的引力场现象；而且该图式仍然非常短，其复杂性依然很低。因此，爱因斯坦的广义相对论引力理论是简单的。

第八章 理论的威力

理论科学家的思维方向不仅有益于他们探求宇宙的根本秘密，而且对许多其他工作也很有用。我们周围的一切事物都是彼此相关的；当然，我们可以将它们看作孤立的实体，并以那种方式去理解它们。但如果将它们视为一种模式的一部分，那将有着多么大的差别！于是那许多的事物都将不只是些有待记忆的条款——它们之间的联系使我们能够使用一种压缩的描述，一种理论，一种图式，于是它变得易于理解和易于记住了。世界将更加易于理解。

对我们人类来说，模式认知是自然地发生的，毕竟我们自身就是复杂适应系统。领会模式、识辨规律、在头脑中建构图式，这些都是我们人类通过生物遗传及文化的传播而获得的天性。但是，作为对选择压力的反应，那些图式常常会升级或降级，被接受或被抛弃。这里的选择压力与在科学中起作用的选择压力是截然不同的，那里图式与观察结果的一致性起着决定性的作用。

从很占的时候起，建构我们周围这个世界的模型的非科学的

方法，在很大程度上成了人类思考的特点，而且这些方法现在仍很盛行。就拿交感巫术来说吧，它在基于相似事物间必有联系这一观点上大做文章。少雨的时候，应该举行一个仪式，在仪式中，将从一个特殊地方取来的水浇到地上，这对世界各地的许多人来说似乎都是很自然的事。这一行动与所希望实现的现象之间的相似性使人联想到，它们之间应该存在着一种因果联系。促使这样一种信仰得以维持的选择压力，不包括客观的成功这一在科学中所使用（至少在科学正常运作时）的准则。这里，起作用的是另外一些类型的选择压力。例如，可能存在这样一些强有力的个人，他们为了维护自己的权威而主持这样的仪式，并鼓励这种信仰。

在那种社团里，人们可能还熟知这样一种交感巫术，它通过对人们产生影响而达到效果，比如吃狮子心会使人更勇敢等等。这种巫术也能取得一些客观的成功，但纯粹是以心理学的方式来实现的：如果一个人相信他吃的东西能使他勇气大增，那将使他对自已表现得勇敢有充分的自信。同样，消极巫术（不管它是否建立在交感巫术的基础上）也可能取得客观上的成功，如果受害者确信它，并认为它正在起作用的话。比如说，你想让我遭受痛苦，因而给我做了个蜡像，里面嵌入一些我剪下的头发和指甲，然后将一些大头针刺入蜡像中。如果我哪怕是只有一点点相信蜡像具有那种魔力，并且知道你正在干这件事，那么我可能就会由于身心医学（pyschosomatic）效应而觉得身体某些相应的部位疼痛，并开始生病（在一种极端情况下，也许甚至会死去）。交感巫术时而而在这样一些情形中取得成功，从而使人们更加相信这种巫术的作用，即便在除偶然之外不能取得客观成功的情形，比如求雨仪式，也如此。

我们将在关于迷信与怀疑论的一章中接着讨论非科学模型的问题，以及使它们具有吸引力的多种原因，但现在我们还是先来考虑以科学方式创立的关于我们周围这个世界的理论，看各种联系与运动关系是如何被发现与阐述的。

“纯理论的”

许多人似乎对理论这一概念颇感困惑，因为他们对这个词（它通常有两种不同的用法）本身就感到很棘手。一方面，它可以指一个自治的法则与原理系统，一个或多或少已被证实或建立，用来解释已知事实或现象的说明。另一方面，它可以指推想、猜测或猜想，或一个未被证明的假说、观点或见解。我们这里所用的“理论”一词是第一种意思，但是很多人在听到“理论”或“理论的”这些词时，都会理解成第二种意思。当某个富于想象力的研究计划被提出来申请基金时，我在约翰·D·和凯瑟琳·T·麦克阿瑟基金董事会的一个同事可能会这样评论说，“我们应该冒险支持它，但是我们必须小心谨慎，以免将钱花到理论性的东西上。”对于一个专业理论家来说，他说的那些话应当是挑战性的，但我明白，在应用“理论的”一词时，他和我所指的意思是不一样的。

关于地名的理论

针对我们周围世界中几乎所有方面作出推理，是很有意义的一件事情。拿地名来说吧，在加利福尼亚熟知西班牙沿海地名的人，对其中许多地名与西班牙探险者和殖民者通常虔诚信仰罗马天主教有关这个事实，是不会感到惊奇的。但是我相信很少有人会去考究一个地方为什么会起那么个特别的名称。可要查究一下给某些岛屿、海湾及沿海各地取带“圣”的名字，如圣迪戈、圣卡塔利那、圣芭芭拉，以及其他一些像康塞普森或圣克鲁兹（圣十字）这样的宗教名字，其背后是否有某个规律，也并非不合理。如果我们在地图上注意到安纳努瓦（新年）角这么个地名，也许会想起点什么。其他地名也可能指一年中的日期吗？当然！在罗马天主教历法中，我们除了找到“1月1日”表示安纳努瓦

之外，还发现以下与地名对应的日期：

圣迪戈	(圣迪戈节)
	11月12日
圣卡塔利那	(圣卡塔利那节)
	11月25日
圣彼得罗	(圣彼得节)
	11月26日
圣芭芭拉	(圣芭芭拉节)
	12月4日
圣尼古拉斯	(圣尼古拉节)
	12月6日
拉普里西马康塞普森	(圣灵怀胎节)
	12月8日

或许探险家们在一次从东南到西北的航海中相继发现了这些地方，而且，他们按发现的日期给这些地方一一命名。的确，学者们已从历史记录中证实，探险家维斯凯罗 (Sebastián Viscaíno) 在 1602 年的 11 月 12 日给圣迪戈湾命名，11 月 25 日给圣卡塔利那岛命名，11 月 26 日给圣彼得罗湾命名，12 月 4 日给圣芭芭拉命名，12 月 6 日给圣尼古拉斯岛命名，12 月 8 日给康塞普森角命名。安纳努瓦角显然是新的 1603 年所看到的第一个角，但它的发现是 1 月 3 日而不是元旦那天。1 月 6 日三王 (Three Kings) 节，维斯凯罗给金斯 (Kings) 角取名。

命名的背后存在着理论，但这个理论具有普适性吗？它适用于圣克鲁兹吗？圣十字架节是 9 月 14 日，这与上述时间序列不相符。那么它是在另一次不同的航海中被命名的吗？这一图式开始具有一些复杂性了。事实上，沿海的许多西班牙宗教名称只与几次航海有关，所以有效复杂性就不是很大了。

在这种推理中，当建构用于描述人类活动结果的概略性图式时，任何例外的情形都可能碰到，不过幸运的是，这种例外情形不会影响到像麦克斯韦电磁场方程那样的图式。例如，位于旧金

山北部，以其州立监狱著称的圣昆廷（San Quentin），听起来似乎像是早期某个西班牙探险家在圣昆廷节所发现的。然而，地名专家的研究表明，“圣”是被错误地加上去的，它本来的名字是昆廷，西班牙语为“Quintin”，是一个1840年在那里被抓住的印第安酋长的名字。

经验理论——季普夫定律

在上述地名例子中，通过推理，不仅识别出了规律性，而且还得出了一个关于这些地名的似真的解释及其这一解释的证明。那是个理想情况。可是，我们碰到的往往是非理想的情况。我们可能发现规律性，预言类似的规律性将在别的地方再出现，然后发现预言被证实，从而识别出一个强有力的模式；可是，它可能是一个不易找到合理解释的模式。在这种情况下，我们使用“经验的”或“唯象的”理论这样一些模糊的字眼来表示我们察觉到了所发生的但还不理解的事情。这样的经验理论有很多，它们将日常生活中所遇到的事物联系在一起。

假定我们拿起一本统计资料的书，比如《世界年鉴》。翻开一看，我们发现一个按人口从多到少排列的城市及其人口数字目录。可能还有关于某些独特的州及其他国家一些城市的表。表中，每个城市都被排了名次，若为1则表示是人口最多的城市，2则表示是人口第二多的城市，依此类推。关于所有这些表，存在着一个能描述人口随名次的增加而减少的普适规则吗？大致说来，答案是肯定的。在一定程度上，人口与名次是成反比的；换句话说，这些按顺序排列的人口数字大致成1，1/2，1/3，1/4，1/5，1/6，1/7，1/8，1/9，1/10，1/11等等的比例。

下面让我们看看大企业按营业总额（即一年中的总销售额）从大到小排列次序的目录。有一个能描述售货总量随名次变化的近似规则吗？有的，它与人口随名次变化的规则相同。营业总额近似地与企业的名次成反比。

按货币额多少排列某个国家在某一年中出口额的情况又怎么样呢？同样，我们发现上述规则对它来说也是个相当不错的近似。

通过详细考察任何一个所提及的目录表，比如城市与人口目录，我们很容易证明那个规则，这是一个有趣的结果。不妨让我们先看看每个人口数目的第三位数字。正如所预料的那样，第三位数字是随机分布的；第三位数字分别是 0, 1, 2, 3 等的机会大致相等。可是，第一位数的分布却是完全不同的一种情形。第一位数为 1 的占绝大多数，其次是 2，依此类推。人口数以 9 开头的百分比是极小的。上面所提到的规则能够预言第一位数字的分布情况，如果严格遵从的话，它将给出，以 1 打头的数目与以 9 开头的数目之比为 45 比 1。

如果我们放下《世界年鉴》这本书，而拿起另一本关于密码的书，其中有这样一个单词表，里面的单词按照某种英语文章中出现频率高低的顺序排列，那么情况又会怎么样呢？每个单词出现频率随名次变化的近似规则是什么呢？这里，我们碰到的还是同一个规则，这对其他语言也同样适用。

一个在哈佛大学教德语，名叫季普夫 (G.K.Zipf) 的人在 30 年代初就注意到了许多这样的关系。它们都是现在被称之为季普夫定律 (Zipf's law) 的不同表现形式。如今，我们应该说季普夫定律是所谓的标度定律 (scaling laws) 或幂定律 (power laws) 的一个例子，后者在物理、生物和行为科学的很多情形中都会碰到。但在 30 年代，这样的定律还是挺新奇的。

在季普夫定律中，被研究量与其名次成反比，也就是成 1 , $1/2$, $1/3$, $1/4$, 等的比例。曼德布罗 (B. Mandelbrot) 已经证明，相继对这一序列进行两种修改可以得到一个更加普适(几乎是最普适)的幂定律。第一个改动是在表示名次的数上加一个常量，得出 $1/(1 + \text{常量})$, $1/(2 + \text{常量})$, $1/(3 + \text{常量})$, $1/(4 + \text{常量})$, 等等。进一步的修改是，以其平方或立方，或平方根，或其他次幂来代替这些分数。例如，若选择平方将能得到序列： $1/(1 + \text{常量})^2$,

表 8-1

名次 (n)	城 市	人口 (1990)	未修正的 季普夫定律 用 n 除 10,000,000	修正后的季普夫 定律 用 $(n-2/5)^{3/4}$ 除 5,000,000
1	纽 约	7,322,564	10,000,000	7,334,265
7	底特律	1,027,974	1,428,571	1,214,261
13	巴尔的摩	736,014	769,231	747,639
19	华盛顿特区	606,900	526,316	558,258
25	新奥尔良	496,938	400,000	452,656
31	堪萨斯城 (密苏里州)	434,829	322,581	384,308
37	弗吉尼亚滩 (弗吉尼亚州)	393,089	270,270	336,015
49	托利多	332,943	204,082	271,639
61	阿灵顿 (得克萨斯州)	261,721	163,934	230,205
73	巴特鲁日 (路易斯安那州)	219,531	136,986	201,033
85	哈里 (佛罗里达州)	188,008	117,647	179,243
97	贝克斯菲尔德 (加州)	174,820	103,093	162,270

摘自《1994 年世界年鉴》的美国城市人口与原季普夫定律及它的一个修正形式的吻合情况。

$1/(2 + \text{常量})^2$, $1/(3 + \text{常量})^2$, $1/(4 + \text{常量})^2$, 等等。在更普适的幂定律中, 幂 1 对应于季普夫定律, 幂 2 对应于平方 (律), 幂 3 对应于立方 (律), $1/2$ 次方对应于平方根 (律), 依此类推。数学家们也给 $3/4$ 次方或 1.0237 次方这样的幂赋予了意义。通常, 我可以将这些幂看作是 1 加上另一个常数。就如给名次加上

一个常数一样，给幂也加上另一个常数。因而，季普夫定律就是上述两个常数均为零的特殊情形。

曼德布罗对季普夫定律的推广仍然相当简单：附加复杂性仅在于两个新的可调常数的引入，一个加到名次上，一个加到幂 1 上〔顺便提一句，可调常数通常被称为“参数”（Parameter），不过近来，可能受到与之相像的“周长”（perimeter）一词的影响而被广泛地误用了。修正后的幂定律中有两个附加参数〕。在任何给定情况下，我们可以引入那样两个常数，并通过调节这两个数而使之与表中数据达到最佳的吻合，而不必拿最初的季普夫定律去与数据作比较。从图 8—1 中我们可以看出，稍经修正的季普夫定律明显比未修正的规则（即两个常数均设为零的情形）能更好地描述人口数字的变化。而其实后者已经能够相当好地描述那些数了。“稍经修正”的意思是，在用作比较的修正幂定律中，所引入的新常数相当小。（表中的常数纯粹是通过考察那些数据而选择出来的。一个最佳的吻合将能得到规律与实际人口数字之间的更好的一致性。）

当季普夫最初描述他的定律时，人们只知道极少数其他标度定律。他试图挑起这样一个重大的讨论，即他的原理怎样使行为科学与物理学区别开来，因为物理学中不存在这些定律。如今，在物理学中发现了许许多多的幂定律之后，各种评论似乎倾向于贬损而不是抬高季普夫的声誉。据说还有另外一个因素也使他名声大降，那就是他对希特勒重新分配欧洲领土的计划表示出某种同情，但他辩论说希特勒的征服趋向于使欧洲各国人口更加符合季普夫定律，这也许很能说明他的态度。

不管这件事情是真是假，它都教给我们一个关于将行为科学应用到政策上的重要教训：正因为可能会出现某些特定关系，所以，那些完全符合标度定律的情况并不总是理想的。在埃斯彭研究所（Aspen Institute）最近的一期讨论班上，我也遇到了这个问题。当时我提到，福利或收入分布在某些特定条件下趋向于服从标度定律。立即有人问我，出现这样一种情况是否是件好事。

我记得当时我耸了耸肩膀。毕竟，决定福利或收入不平均程度的分布坡度，取决于定律中出现什么样的幂。

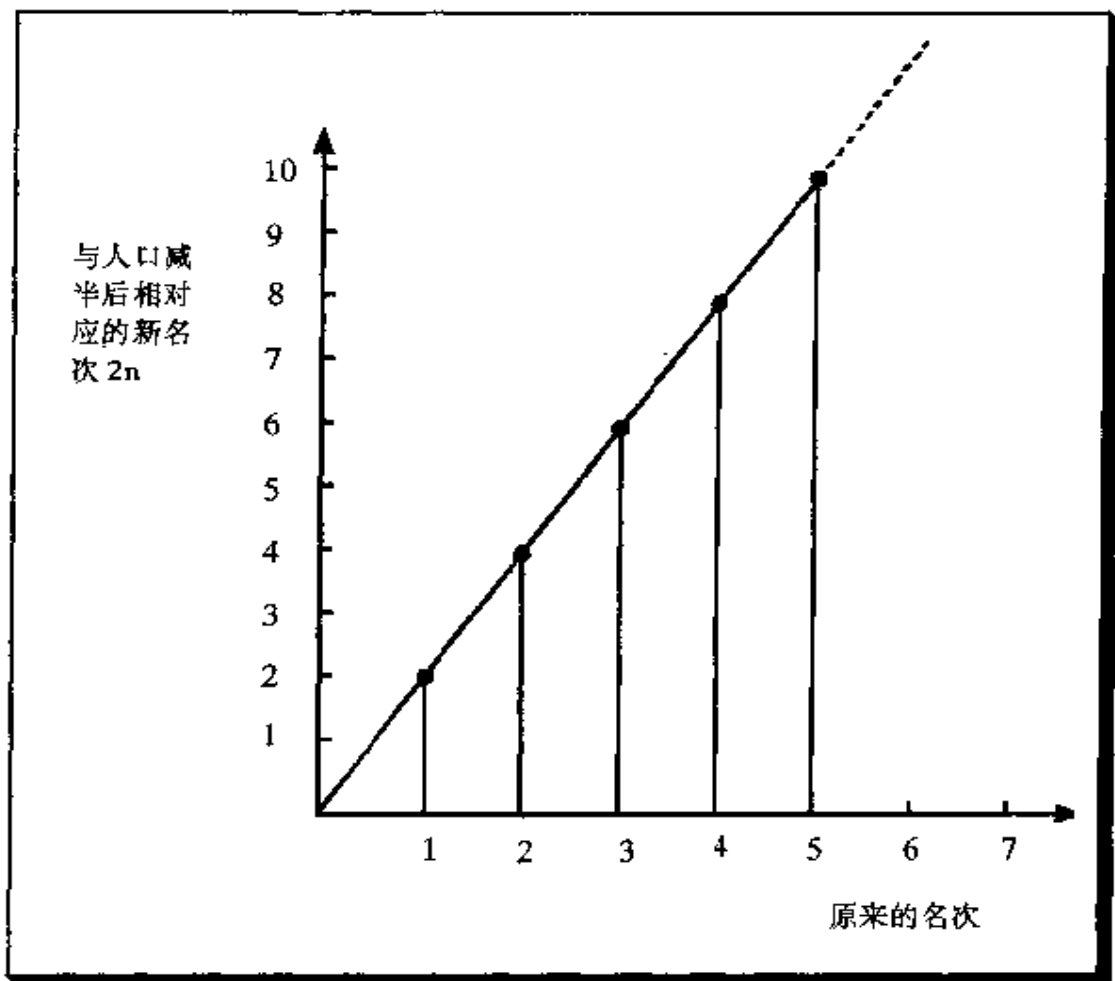


图 8-1 幂定律(这里是原季普夫定律)的标度性

季普夫定律的基本机制至今还不清楚，许多其他幂定律也一样。在研究这些定律（特别是它们与分形的联系）方面作出过重要贡献的曼德布罗很坦白地承认，如果说他在科学生涯的早期取得了成功，那么，部分原因就在于他将重点放在探寻与描述幂定律上，而不是试图解释它们。（他在《自然界的分形几何》（*The Fractal Geometry of Nature*）一书中，曾提到“喜欢强调结果而非原因”。）不过他立即又指出，在某些领域，特别是物理学中，已经提出了相当具有说服力的解释。例如，非线性动力学中的混沌现象就与分形和幂定律有着密切的联系，不过其联系方式科学

家们尚未完全弄清楚。曼德布罗也时常建构一些符合幂定律的模型。例如，他计算了由著名的猴子打出的文章中，单词的出现频率。它们服从修正后的季普夫定律，其幂随着打出符号的越来越多而趋近于 1（对应于原季普夫定律的幂值）。（顺便提一句，他也注意到，在用正常语言写出的文章中，当单词的出现频率符合修正后的季普夫定律时，其幂可能远不等于 1，偏差量的大小取决于所讨论的文章中词汇量的大小。）

标度不变性

最近几年，在解释某些幂定律方面取得了很大的进展。这些努力之一涉及到被称作“自组织临界态”（self-organized criticality）的问题。这一概念是由丹麦理论物理学家佩尔·贝克（Per Bak）和唐超（Chao Tang）与库特·维森菲尔德（Kurt Wiesenfeld）一起提出来的。最初他们将这个概念应用到沙漠或沙滩上常见的沙堆上，那些沙堆大致成圆锥形，每堆都具有清晰的斜坡。这是如何形成的呢？假定风不断将沙粒吹到沙堆上（或者物理学家用容器不断往试验沙堆上滴加沙粒）。随着沙堆的增大，其斜面变得越来越陡，但这种变化关系只发生在坡度达到一个临界值之前。一旦坡度达到那个临界值，继续添加的沙粒开始使沙堆崩落，从而降低其高度。

如果沙堆坡度大于临界值，那么将会出现一种不稳定的情况，这时沙堆的崩落迅速地使坡度不断减小，直到它回到临界值为止。这样，沙堆自然而然地被“吸引”到坡度的临界值，而无需任何特殊的外部调节（所以称为“自组织”临界态）。

崩落量通常用参与崩落的沙粒数来衡量。观察表明，当沙堆的坡度接近其临界值时，崩落量相当精确地服从幂定律。

在这个情况中，附加到季普夫定律的幂上的常数很大。换句话说，如果按从大到小的顺序给崩落量排名，那么参与崩落的沙粒数将随名次的增大而急剧减少。沙堆中崩落的分布是一个无论

从理论上，还是实验上都被成功地研究过的一个幂定律的例子。由贝克和他的同事所做的崩落过程的数值模拟，不但重现了该定律，而且还得出大指数（幂）的一个近似值。

尽管随着名次的增加，崩落量急剧下降，但在一定程度上，几乎各种标度的崩落量都存在。一般来说，服从幂定律的分布是一个“标度不变”的分布。这就是幂定律也被称为“标度定律”的原因。那么一个分布律具有标度不变性究竟意味着什么呢？

幂定律的标度不变性可以通过原季普夫定律来很好地说明。拿城市人口来说，根据季普夫定律，各城市的人口数成 $1/1:1/2:1/3:1/4:1/5\cdots$ 的比例。为简单起见，将人口数取成 100 万， $\frac{100}{2}$ 万， $\frac{100}{3}$ 万，等等。让我们用一个固定不变的分数，不妨设为 $1/2$ ，去乘那些人口数字；那么新的以百万计的人口数就变成了 $1/2, 1/4, 1/6, 1/8, 1/10\cdots$ 它们恰好是原来处于第 2, 4, 6, 8, 10, $\cdots$ 位的原有人口数。因此，以 2 除所有的人口数相当于以 2 乘城市的名次，使它们从 1, 2, 3, 4, $\cdots$ 变成 2, 4, 6, 8, $\cdots$ 。如图 8—1 所示，将新名次与原来名次的关系在图上画出来，将得到一条直线。

这种直线关系可作为标度定律（其中涉及到的量可以为任何类型）的定义：所有各个量换算为任意常数倍（在上述例子中为 $1/2$ 倍）相当于给原来的那组量编新的名次，使新名次与原名次成直线关系。（新的名次并不总是整数，但在每种情况下，规模大小与名次之间的关系式都将给出一条简单的光滑曲线，这条曲线可用作整数之间的插值线。）

在沙堆崩落的情况中，因为崩落量的分布服从幂定律，所以用任一公因数去换算所有崩落量，相当于对原来的崩落序列的名次进行一个简单的重编。很显然，在这样一个定律中不存在任何特殊的标度，但在被研究量取值范围的两端除外，因为那里存在明显的限制。任何崩落中的粒子数都不会少于一个；显然，幂定律在单粒子的标度上必然不适用。在取值范围的另一端，任何崩

落中的粒子数都不会大于所讨论的沙堆中的总粒子数。但是至少最大的崩落可以轻易地挑拣出来，并被冠以第一名。

琢磨这最大的崩落，不禁使人想起自然事件规模的幂定律分布中一个常有特征。名次极靠前的那些最大或最具毁灭性的事件，即使其或多或少处在幂定律所规定的曲线上，也仍然可能被当作具有大量显著后果的单个历史事件，而名次很靠后的那些小事件，人们通常只是从统计角度来考虑。里氏 8.5 级左右的巨大地震都被记载在耸人听闻的报纸标题与历史书上（特别是当震灾波及到大城市时）。而众多关于里氏 1.5 级左右地震的记录只是默默无闻地居于地震专家的数据库中，主要供统计研究使用。然而地震中的能量释放确实遵循幂定律，这是很早以前被两位现已故去的加州理工学院的教授，查尔斯·里克特（Charles Richter）和他的顾问比诺·古腾伯格（Beno Gutenberg）所发现的。（在 1933 年的一天，古腾伯格和爱因斯坦两人正专心地讨论地震学的问题，以至于他们谁也没有注意到由于长堤（Long Beach）地震引起的加州理工学院校园的震颤。）同样，不断飞抵地球的极小的陨石主要是由专家们在统计测量中摘记下来的，而在 6500 万年以前发生的，促使白垩纪绝灭的巨大碰撞则被认为是生物圈历史中的重大的单个事件。

因为幂定律已被证明是在自组织临界态情况下生效，所以本已很流行的词组“自组织”就具有了更大的通用性，它常常与“自然生成”（emergent）一词并列使用。包括圣菲研究所许多成员在内的科学家们正力图弄清楚，在没有引入外部作用的情况下，结构是怎样产生的。在种种令人惊讶的过程中，具有简单规则的系统形成了显然很复杂的结构。这些系统被说成是自组织的，它们的性质也被说成是自然生成的。最完美的例子是宇宙自身，它在简单规则与偶然性作用的基础上，产生出了十足的复杂性。

在很多情况下，由于现代计算机的使用，关于自生结构的研究已经容易多了。通过计算机的方式比在纸上列方程往往更易于

跟踪新特征的自生。由于自生过程需花费很长的时间，因此计算机的作用往往特别引人注目，因为计算机能够通过使用一个很大的因子而有效地加速有关过程。可是计算机计算仍然需要许多步骤，这将引起一个全新的问题。

深度与隐蔽性

到目前为止，在对复杂性所进行的讨论中，我们考虑了关于系统或其规律性的压缩描述（或用于产生编码描述的短小计算机程序），并将各种各样的复杂性与那些描述或程序的长度联系起来。可是，我们很少关注为实现压缩或识别规律所需要的时间、人力或技巧。既然一个理论科学家的工作严格地包括识别规律，并将有关它们的描述压缩成理论，所以我们对上述因素的忽视也就等于是藐视了理论家工作的价值，这显然是一种荒诞的犯罪行为，必须采取措施来矫正这种错误。

我们已经了解到，要完全捕捉住关于复杂性的直觉观念，需要有好几种不同的概念。下面我们就要给有效复杂性的定义补充其他一些量的定义，这些量将描述，计算机要花多长时间才能从一个短小的程序到给出对一个系统的描述，反之亦然。（在一定程度上，这些量必然与一个问题的计算复杂性相似，后者已在前面被我们定义成计算机产生一个解答所用的最短时间。）

许多人都研究过这样的附加概念，但唯有查尔斯·贝纳特（Charles Bennett）是以一种特别优美的方式来处理它们的。查尔斯·贝纳特是 IBM 公司一位卓越的思想家，领导给他的任务就是创立新的观点与概念，将它们发表，并到各处去作关于它们的演讲。我乐意拿他的旅行同 12 世纪时期一些抒情诗人在现在的法国南部，从一个庭院到另一个庭院的游历作对比。那些诗人们吟诵的是爱情诗，而贝纳特“吟诵”的是复杂性与熵，量子计算机（quantum computers）与量子编码（quantum encipherment）。我有幸与他一起在圣菲共过事，并在帕沙第纳一起工作过一学期，

当时他在我们加州理工学院的研究小组中作访问学者。

贝纳特所定义的两个特别有意思的量“深度”(depth)与“隐蔽性”(crypticity)均与计算复杂性有关,并且它们彼此之间也是相关的。对这两个量的研究进一步说明,一个系统虽然很明显十分复杂,但由于其描述可以通过一个简短的程序得出,因而具有很低的算法信息量与有效复杂性。关键在于下述问题的答案:(1)从一个简短的程序或一个高度压缩的图式发展到一个对系统本身或其规律的成熟的描述,其艰难程度如何?(2)从系统着手,将对它的描述(或对其规律的描述)压缩成一个程序或图式,又有多艰难?

粗略地说,深度是第一种困难的量度,而隐蔽性是第二种困难的量度。显然,与理论家的工作价值有关的是隐蔽性(虽然关于理论创立过程的更细致的描述,还应该对人的灵巧与纯粹的艰难作出区别)。

一个假想的例子

为了举例说明许多的简单性怎样与巨大的深度产生联系,让我们回到哥德巴赫关于每个大于2的偶数都可表示为两个素数之和的猜想上来。如前面所提到的,这一猜想从来未被证明或证伪过,但是在某个相当大的范围内的所有偶数都被核实了,这个范围是根据计算机的容量与研究者的耐心而设定的。

以前我们允许自己相信哥德巴赫猜想(在数论公理的基础上)是不可判定的。这次让我们假定它是错误的。在这种情况下,某个很大的数 g 是大于2但不能表示为两个素数之和的最小的偶数。这个假想的 g 有一个相当简单的描述,也就是我们刚刚给出来的。同样,也会有很简短的程序来求它。例如,你只需有顺序地寻找越来越大的素数,并将所找到的最大素数加上3,然后检验小于或等于所得数的全部偶数,看它们是否符合哥德巴赫猜想。用这一方法,违背哥德巴赫猜想的最小偶数 g 将最终被发现。

如果哥德巴赫猜想真是错的，那么用于寻找 g 的任何一个简短程序，其运行时间实际上可能很长。因而在这种假想情况下，数 g 有着相当低的算法信息量与有效复杂性，但有很大的深度。

再 论 深 度

贝纳特对深度的定义涉及到计算机，与我们讨论算法信息量时所引入的那种计算机相同：一个理想的多功能的计算机，它的存贮容量在任何时候都可以按需要扩充（或一开始就具有无限大的容量）。他从一个用来描述被研究系统的信息比特串入手。他不仅考虑致使计算机打印出那个比特串然后停机的最短程序，而且考虑具有相同作用的所有简短程序。对每个这样的程序来说，他关心的是从输入程序到得到信息串需要多长的计算时间。最后，他使用一个偏重于较短程序的求平均方法，将时间对程序的长度求平均。

贝纳特还用一种稍微不同的形式重新定义了深度这个概念，他使用了格里高里·蔡廷的隐喻。假定著名的猴子打出的不是散文，而是计算机程序。让我们把注意力只集中于那些使计算机打印出我们所关注的特定信息串然后停机的少数程序。在所有这些程序中，所需要的计算机时间小于某个特定值 T 的概率是多大呢？设那个概率为 P ，那么深度 d 将是 T 的某种平均值，一个取决于 $P-T$ 曲线的平均值。

图 8—2 中的曲线给出了概率 P 随所允许的最大计算机时间 T 变化的略图。当 T 很小的时候，猴子们要敲出一个在如此短的时间内算出所需结果的程序，其可能性极小，因而 P 趋于 0。当 T 非常大时，概率必然接近 1。大致说来，深度 d 等于 $P-T$ 曲线上概率上升部分的时间。它告诉我们，为了挑选出能使计算机打印出信息串然后停机的最佳部分程序，可允许的最大运行时间需要多大。因此，深度是衡量一个信息串的产生所需时间的粗略尺度。

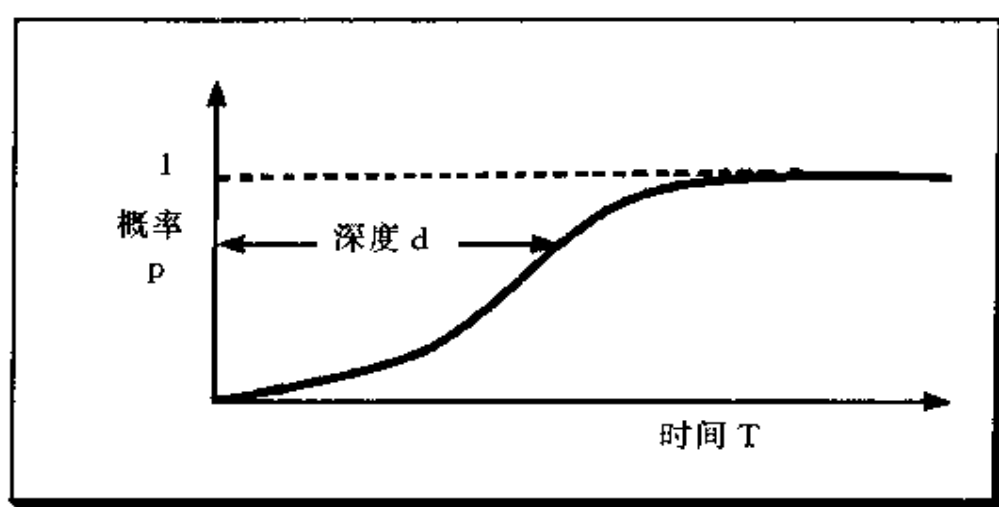


图 8-2 深度与时间的关系

若自然界的一个系统具有很大的深度，那就表明，它是经过长时期进化形成的，或者说它滋生于由长时间进化而形成的某种东西。对自然或历史文物保护感兴趣的人，正试图保护自然群体或人类文化中所显示出的深度和有效复杂性。

但是，如贝纳特所证明的那样，在漫长的进化过程中，深度有被传递给此过程中产生的副产品的倾向。我们发现，深度不仅存在于包括人类在内的当今的生命形式中，存在于人类手工制作的不朽的艺术品中，存在于恐龙或冰河时代哺乳动物的化石中，而且还存在于沙滩上开启啤酒罐的拉扣或描绘在峡谷壁上的粗糙的雕刻中。保护主义者不必保护所有具有深度的事物。

深度与 AIC

虽然深度是运行时间对程序长度的平均，它偏重于突出较短的程序，但我们往往可以通过最短程序的运行时间，来很好地理解深度的概念。比如，假定信息串是完全规则的，其 AIC 接近于零。那么，最短程序的运行时间不会很长——计算机不必为执行像“打印 12 兆个 0”这样的程序而进行长时间的“思考”（当

然，如果打印机速度很慢的话，打印出这些 0 倒是可能要花费一些时间)。所以，当 AIC 非常低时，深度也就很小。

对于具有给定长度的信息串来说，具有最大 AIC 的随机串的情况怎么样呢？在计算机方面，从最短的程序——“打印数串……”——到实际打印出该数串，同样不需要“思考”。所以，与 AIC 很低时的情况一样，当 AIC 最大时，深度也很小。这个情形与图 5—1 所示的最大有效复杂性随 AIC 变化的方式有些相似。这里，我们可以大致看出最大深度随 AIC 变化的规律。在 AIC 最小与最大这样两个极限值附近，深度很小，而在有序与无

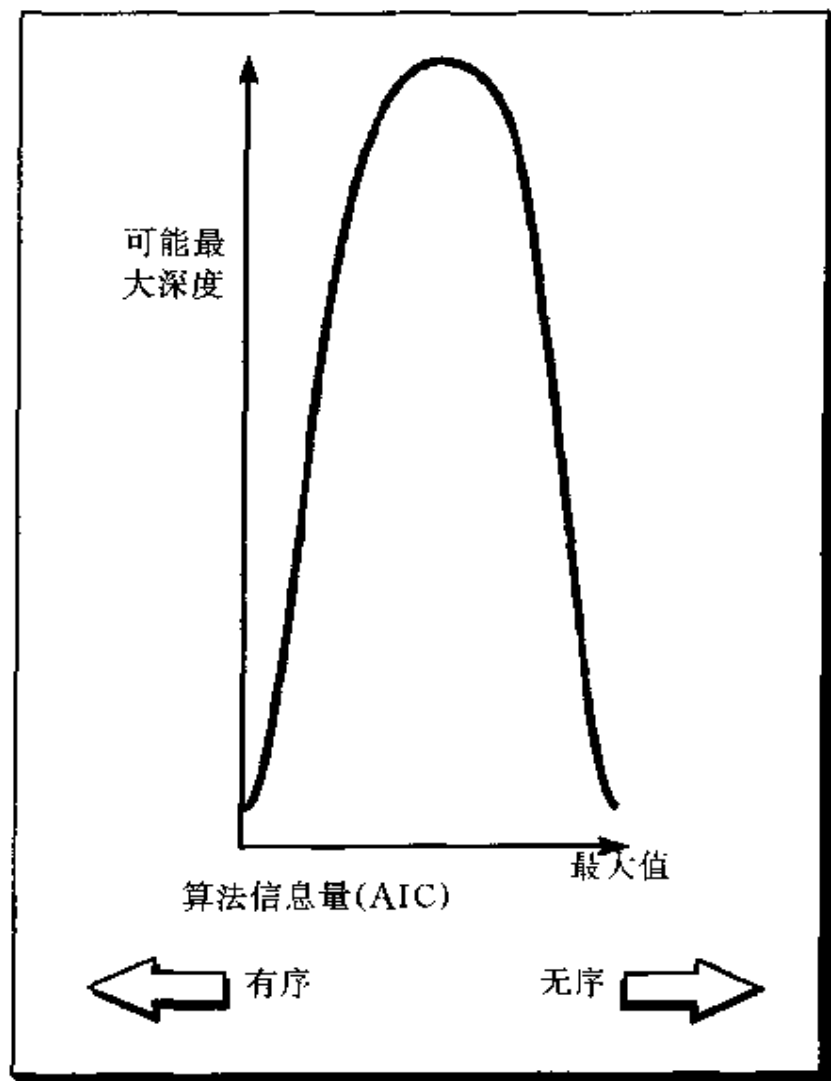


图 8—3 可能的最大深度随 AIC 变化的略图

序之间的中间区域，各处的深度都可以很大。当然，在那个中间区域，深度并不是非大不可。

注意，这个关系图与图 5—1 的那个图的形状不同。尽管两者都只是略图，但它们显示出，即使 AIC 的值很接近完全有序或完全无序，深度也可以很大，但其有效复杂性却依然很小。

隐蔽性与理论化

隐蔽性涉及的是与深度定义相反的过程。信息串的隐蔽性，是指一个标准计算机从该信息串开始，到找出能致使计算机打印出该串然后停机的一个较短程序，所需要的最少时间。

假定该信息串是由一个理论家所研究的数据流编码而得，那么，它的隐蔽性是衡量该理论家工作艰难的粗略性尺度，这与定义中计算机的艰难度没有太大的差别。理论家识辨出尽可能多的规律性，也就是将数据流各部分联系起来的交互信息，然后建构尽可能简单、自洽的假说，用来解释观察到的规律性。

规律是数据流的可压缩的部分。它们一部分来源于自然界的基本定律，另一部分则来源于偶然事件的某些特定结果，而这些偶然事件本来也可能导致其他的结果。但是，除规律性之外，数据流还具有随机特征，它们来自那些没有形成规律的偶然事件。那些特征具有不可压缩性。所以，当理论家尽可能地压缩数据流的规律性时，他同时也是在寻找一个关于整个数据流的简要描述，一个由压缩的规律性与不可压缩的随机补充信息构成的描述。同样，一个使计算机打印出信息串（并进而停机）的简短程序，可以认为是一个描述该信息串规律性的基本程序，辅以输入用来描述特殊偶然条件的信息。

虽然我们对理论的讨论仅涉及到问题的皮毛，但我们毕竟已经述及有关地名、统计表的经验公式、沙堆高度及经典电磁学与引力等方面的理论创立。虽然这些不同种类的理论创立过程在形式上有着很大的相似性，但它们牵涉到的是许多不同层次的发

现，而将这些不同的层次区分开来是非常有用的。被研究的是物理学的基本定律，还是适用于诸如沙堆之类的混乱系统的近似定律？是关于城市和企业这些人类社会机构的虽然粗略但很普遍的经验定律，还是关于某一特定地理区域的人们所使用的地名有许多例外的特殊规则呢？很明显，这些不同的理论原理在准确性与普适性方面存在着很大的差别。人们经常讨论哪个理论比另外一些更基本，可这是什么意思呢？

第九章 什么是基本？

在衡量什么是最基本的尺度时，夸克与美洲豹几乎位于相对的两个极端。基本粒子物理学与宇宙学是最基本的科学学科，而关于复杂生物的研究，尽管显然非常重要，但却远远没有那么基本。为了讨论科学的分级问题，至少必须理清两个不同的问题，其中之一与纯粹的习惯问题有关，另一个则关系到不同学科之间的真正联系。

我听说，一所法国大学的科学教授曾常常以一种固定的顺序讨论与各学科有关的事物：先是数学，其次是物理学，化学，生理学，等等。从这一安排来看，他们似乎经常忽略了生物学家的事情。

同样，在设立诺贝尔奖的瑞典炸药界泰斗阿尔弗雷德·诺贝尔的遗嘱中，科学奖的排列顺序为：首先是物理学，其次是化学，再次是生理学与医学。因为这个原因，在斯德哥尔摩的颁奖典礼中，物理学奖总是被最先授予。如果只有一个物理学奖获得者，且该获奖者已婚，那么他的妻子将有幸被瑞典国王挽着手进

入宴会厅。〔当我的朋友萨拉姆 (Abdus Salam)，一个巴基斯坦的穆斯林，在 1979 年分享诺贝尔物理学奖时，把他的两个妻子都带到了瑞典，这毫无疑问引起了一些外交礼节问题。〕在外交礼节中，化学奖获得者排在第二，而生理学与医学奖获得者则位列第三。由于某些未被真正弄清楚的原因，诺贝尔的遗嘱中遗漏了数学。有个一再流传的谣言说，他痛恨一位叫密他克-莱福勒 (Mittag-Leffler) 的瑞典数学家，因为这位数学家抢走了一个女人对他的爱情。不过据我所知，这仅仅是个谣传而已。

学科的这种分级的原因，可以部分地追溯到 19 世纪时期的法国哲学家奥古斯特·孔特 (Auguste Comte)，他认为，天文学是最基本的科学学科，物理学其次，等等。（他将数学看作一种逻辑工具，而不是科学。）他的看法有道理吗？如果有，又是从哪方面来说的呢？这里有必要撇下声望的问题而试图弄清楚，从科学观点来看，这样一种分级究竟指的是什么。

数学的特征

首先，如果科学被理解成一门用于描述自然界及其规律的学科的话，那么数学确实不是一门科学。数学更加关注的是，证明某些假设的逻辑结果。因为这个原因，它可以从科学的清单中勾掉（就如它被诺贝尔遗漏掉一样），仅被视为很有趣而且也是科学的一个极其有用的工具（应用数学）。

另一个看待数学的方法是，可以认为应用数学研究科学理论中出现的结构，而纯数学研究的不仅包括那些结构，而且还包括科学中所有可能出现过的（或可能将要出现的）结构。那么，数学是对假想世界的严密的研究。从这方面来看，它是一种科学——一门关于目前是什么、将来可能是什么以及曾经可能是什么的科学。

如此看来，数学就成了最基本的科学吗？那其他学科又如何呢？说物理学比化学更基本，或化学比生物学更基本，是什么意思

思呢？物理学中的不同部分又怎么样呢？难道不是一些部分比其他部分更基本吗？一般来说，是什么使得一门科学比另一门科学更基本呢？

我认为，如果

1. A 科学的定律在理论上涵盖 B 科学的现象与定律。
2. A 科学的定律比 B 科学的定律更具有普遍性（也就是说，B 科学比 A 科学更专门化，B 科学定律的适用条件较 A 科学定律的更特殊）。

那么，A 科学就比 B 科学更基本。

如果数学真是科学，那么，根据上述标准，它比其他任何科学都更基本。所有可想出的数学结构都在它的研究范围内，对描述自然现象有用的结构仅只是数学家研究或可能研究的那些结构中一个极小的子集。通过那个小子集，数学定律的确涵盖了其他科学中用到的所有理论。但是其他科学怎么样呢？它们之中又存在什么样的关系呢？

化学与电子物理学

当著名的英国理论物理学家狄拉克 (P. A. M. Dirac) 在 1928 年发表用来描述电子的相对论量子力学方程时，据说他曾评论他的公式解释了大部分的物理学与全部的化学。当然，他的话有些言过其实，不过我们还是能够懂得他说这话的意思。尤其在化学方面，因它主要研究诸如原子、分子之类客体的行为，而这些客体本身即由重的原子核与环绕原子核的轻的电子组成。电子与原子核及电子与电子之间通过电磁效应而产生的相互作用，是许多化学现象的基础。

狄拉克方程描述了电子与电磁场之间的相互作用，它在短短的几年时间内就导致了一门关于电子和电磁学的成熟相对论量子力学理论的产生。这门理论就是量子电动力学，或 QED，它与大量实验的观察结果都符合得很好（因而用这么个缩写是非常恰

当然，这使我们中的一些人回想起学生时代，当时我们在一个数学证明的最后使用“QED”一词来表示拉丁文“quod erat demonstrandum”，意思是“这就是要证明的”)。

在原则上，QED 确实可以解释大量化学现象。它严格地适用于这样一些问题，即其中的重核可被近似地看作固定不动的带电点粒子。对 QED 进行简单的推广即可用来处理核的运动，也可用来处理核是非质点的运动情况。

理论上，理论物理学家可以使用 QED 来计算任何化学系统的行为，如果在原子核内部结构的细节相对来说不重要的话。只要是利用合理的 QED 近似所进行的关于这些化学过程的计算，它们就能成功地预言观察结果。事实上，在大多数情况下，有一个被证明为合理的特殊的 QED 近似能够做到这一点。它被称为带有库仑力的薛定谔方程，可用于“非相对论性的”化学系统，在这种系统中电子与核的运动速度与光速相比都非常地小。这一近似在量子力学发展的初期，狄拉克的相对论方程出现之前 3 年就已经被发现了。

为了从基本物理理论中导出化学性质，可以说有必要向该理论提出化学方面的问题。你必须在计算中既引入基本方程，又要使用所讨论的化学系统或化学过程的特定条件。例如，两个氢原子的最低能量状态是氢分子 H_2 。化学中的一个重要问题是分子的结合能有多大；更精确地说，分子的能量比组成它的原子单独存在时的能量之和低多少。答案可以从 QED 计算得到。但首先必须“向方程询问”那个特定分子的最低能量状态的性质。提出这样的化学问题，其有关的低能条件并不具有普遍性。在太阳中心数千万度的高温下，氢原子全都分裂成为它们的组成成分：电子和质子。在那里原子和分子的存在概率小到没有任何实际意义。可以说，在太阳的中心没有化学。

从我们前面提出的关于什么更基本的两条标准来看，QED 比化学更基本。理论上，化学规律可以从 QED 导出，只要将描述适当化学条件的附加信息代入方程即可；而且，那些条件是特

殊的——它们不能在整个宇宙中处处成立。

化学在其自身层次上

实际上，即使现在有最快而且最大的计算机可供使用，也只有最简单的化学问题可以通过基本物理理论计算出来。可以这样解决的问题正在增多，但是化学中的大多数情况仍然是使用化学自身的而非物理的概念与公式来描述。

通常，科学家们习惯于直接在特殊领域提出用于描述观察结果的理论，而不从一个更基本领域中的理论出发去推出相应的理论。虽然在提供特殊附加信息的情况下，从基本理论出发的推导在理论上是可行的，但是在实际中，在大多数情况下都十分困难或者不可能。

例如，化学家们关心原子之间各种不同的化学键（包括一个氢分子中两个氢原子之间的键）。他们在实验过程中提出了许多关于化学键的具体观点，这使他们能够对化学反应作出预言。同时，理论化学家们竭力从 QED 的近似出发去推导那些观点。除最简单的情况之外，他们只能取得部分的成功，但他们毫不怀疑，在理论上，如果有足够强大的计算工具，他们是可以取得更大成功的。

阶梯（或桥梁）与还原

这样，我们得到了科学不同层次的暗喻，其中底部是最基本的，而顶端是最不基本的。非核化学位于 QED “上面”的某一级。在很简单的情况下，一个 QED 的近似被直接用来预言化学层次的结果。但是，大多数情况下，用来解释与预言现象的定律是在上层（化学领域）形成的，然后科学家们才尽可能努力地从较低层次（QED）推导出那些定律。两个层次都以科学为目标，而且科学家们努力建构它们之间的阶梯（或桥梁）。

我们的讨论不必局限于非核现象。自从1930年左右QED产生以来，它已被大大地推广了。现在整个基本粒子物理学已经崛起。基本粒子理论的任务不仅是描述电子和电磁学，而且还要描述所有的基本粒子（所有物质的基本构成单元）和自然界所有的力。我将一生的大部分精力奉献给了这一领域。基本粒子理论描述原子核内部以及电子之间所发生的现象。因此，QED与用于处理电子的那部分化学之间的关系，可以看作是位于较基本层次上的整个基本粒子物理学与位于非基本层次上（包括核化学在内）的整个化学之间关系的一个特殊情形。

用较低层次的理论来解释较高层次的现象的过程，通常被称为“还原”（reduction）。我没听说过哪个严肃的科学家相信，存在着不是起源于基本物理力的特殊的化学力。虽然一些化学家可能不喜欢这么说，但事实的确如此。从理论上讲，化学可以从基本粒子物理学导出。从这一意义上说，我们都是还原主义者（reductionists），至少在物理和化学方面是如此。但是，在允许化学现象发生的特定条件下，化学比基本粒子物理更特殊这一事实，意味着为了导出化学定律，哪怕是在理论上导出，必须将那些特殊条件的信息代入基本粒子物理方程。没有这一思想，还原的概念就是不完善的。

所有这些给我们的启示是，尽管各门科学占据着不同的层次，但它们都是一个联合整体的一部分。那个整体结构的统一性通过各部分之间的联系而得以巩固。位于某一层次上的科学涵盖了位于较上层的不那么基本的科学的定律。但是后者由于更特殊，因而除了前者的定律之外，还需要更多的信息。在每一层次上，都有一些对本层次非常重要的定律有待发现。科学工作不仅包括研究各个层次上的那些定律，同时还要从上而下及由下向上地在它们之间建构阶梯。

上述讨论同样适用于物理学内部。基本粒子物理学定律对整个宇宙中、处于各种条件下的各种物质都有效。但是，在宇宙膨胀的最初阶段，核物理实际上是不适用的，因为密度太大，以至

于单独的原子核，甚至中子和质子都不能形成。不过，核物理学对于了解太阳中心所发生的事情依然极其重要，在那里，尽管化学反应的条件非常苛刻，但热核反应（与氢弹中的反应有些相似）仍是产生太阳能量的来源。

凝聚态物理研究诸如晶体、玻璃和液体，超导体与半导体之类的系统，也是一门很特殊的学科，只在允许它所研究的结构存在的条件下（比如足够低的温度）才适用。即便是理论上要从基本粒子物理学导出凝聚态物理，也必须先将那些特殊条件列出。

生物学还原所需要的信息

处于等级中另一层次的生物学，与物理学和化学之间的关系如何呢？当今还有哪位严肃的科学家会像过去几个世纪中常见的那样，相信生物学中存在着不是源于物理-化学的特殊“活力”？如果有，那也是极少数。我们中间几乎所有的人都认为在理论上，生命依赖于物理学和化学定律，就像化学定律依赖物理学定律一样，从这一意义来说，我们又成了一种还原主义者。然而像化学一样，生物学依然非常值得按其自身条件，在其自身层次上来进行研究，尽管阶梯的建构工作仍在进行。

而且，地球生物学极为特殊，这里地球生物学指的是我们这个行星上的生物系统，它们与那些围绕遥远恒星运行的行星上的复杂适应系统，一定有着很大的差别。在宇宙中这样的行星必定存在，但或许这些行星上仅有的复杂适应系统，是我们见了也未必能将他们描述为活的系统。（举一个科幻小说中常见的例子。假想一个社会由非常先进的机器人与计算机组成，它们是很之前由一个现已绝灭的人种所制造的机器人与计算机发展而来，而那个绝灭的人种在其生存期间，我们或许可以把他们描述为“活着”。）然而，即使我们只关注“活着”的人类，他们中的许多人也仍然可能显示出与地球上的人类极不相同的特性。为了描述地球生物现象，除物理和化学定律之外，还须提供大量的特殊附加

信息。

首先，地球上所有生命所共有的许多特征可能是在这一行星上的生命史早期所发生的一些偶然事件的结果，它们也完全有可能以另外一些不同的形式出现（那些不同的生命形式也可能很久之前在地球上存在过）。地球上所有生物的基因都由 A, C, G, T 四种核苷酸组成，这种规则似乎适用于当今我们的行星，但在空间与时间的宇宙标度上也未必具有普适性。在其他许多星球上，也许存在着其他许多可能的规则；而遵循其他规则的生命在数十亿年前可能也在地球上生存过，后来他们被以常见的 A, C, G, T 为基础的生命所淘汰。

生物化学——有效复杂性 & 深度的比较

可能具有或可能不具有唯一性的问题，并不仅仅限于用来描述当今所有地球生命的某组特定的核苷酸，对地球上所有生命化学的每一条普遍性质，科学家们也在讨论着同样的问题。一些理论家声称，宇宙空间不同星球的生命化学，必定具有各种不同的形式。如果真是这样，地球上的情形就是大量偶然事件的结果，这些偶然事件促成了地球上生物化学的规律，从而使之获得很大的有效复杂性。

另一方面，一些理论家认为，生物化学本质上是唯一的，建立在物理基本定律基础上的化学定律，使得一种生命化学不同于地球上所发现的生命化学的可能性很小。持这一观点的人实际上是认为，从基本定律到生物化学定律的过程几乎不涉及任何新的信息，因此对有效复杂性贡献很小。但是，计算机可能需要进行大量的计算，才能从物理基本定律导出生物化学的近唯一性这个理论命题。在这种情况下，生物化学即使没有很大的有效复杂性，也仍然具有很大的深度。另一种表达地球生物化学的近唯一性问题的方式是，看生物化学是否主要取决于对物理学提出恰当的问题，或者还以一种重要的方式依赖于历史。

生命：高度的有效复杂性——有序与无序之间

即使基本的地球生命化学与历史关系不大，生物学中也仍然存在着巨大的有效复杂性，远远大于诸如化学或凝聚态物理这类学科中的有效复杂性。想想自地球上生命产生以来 40 亿年左右的时间里，有多么巨大数量的进化性变化是由偶然事件引起的！那些偶然事件中的一些（也许只是很小的一部分，但绝对数量仍然很大）在这一星球上的生命之后续历史中，及对于生物圈中生命形式之丰富多彩的特点，起着重要的作用。生物学定律确实依赖于物理学和化学定律，但它们还取决于大量由偶然事件产生的附加信息。这里，你可能会发现，在理论上可能进行的那种到物理学基本定律的还原，与一个缺乏经验的读者所理解的“还原”一词之间，存在着很大的差别，而且这种差别远远大于从核物理、凝聚态物理或化学到基本物理学的还原的情形。生物科学远比基本物理学复杂，因为地球生物学的许多定律不仅与基本定律有关，而且还与大量偶然事件有关。

但是，即使是对所有星球上所有种类的复杂适应系统进行研究，这种研究也仍然是相当特殊的。外界环境必须显示出足够的规律性，以供系统用于学习或适应，但同时又不能有更多的规律性，以致什么事情都不发生。例如，如果所讨论的环境是太阳的中心，温度高达数千万度，那么它几乎有着完全的随机性，近于最大的算法信息量，而没有有效复杂性或大的深度，那么任何与生命相类似的事物都难以生存。如果外部环境是一个处于绝对零度的完美的晶体，算法信息量几乎为零，这时同样不可能有很大的有效复杂性或大的深度，因而也不会有生命存在。复杂适应系统的运作需要有介于有序与无序之间的条件。

地球的表面提供了一个具有适中算法信息量的环境，这里深度和有效复杂性同时具备，这就是为什么生命能在这里发生、进化的部分原因。当然，在几十亿年以前地球的条件下，只有极原

始的生命形式才能进化，但后来那些生物本身改变了生物圈的成分，特别是通过向大气中放出氧气这样的方式，从而营造了一个更接近于现在的地球生物圈的环境，使得具有更复杂的组织的高级生命形式能够进化。位于有序与无序之间的条件不仅是能产生生命的环境的特点，也是具有高度有效复杂性与极大深度的生命自身的特点。

心理学与神经生物学——意识与脑

地球上的复杂适应系统已经导致好几种位于生物学“之上”的学科的产生。其中最重要的学科之一是关于动物，尤其是具有最复杂心理状态的人类的心理学。同样，现代科学家当中很少有人会相信，存在着本质上不能归于生物学的，最后也不能归于物理化学的“精神力”。于是，从这一意义上来说，我们所有人又都是还原主义者。但是对于心理学（有时甚至生物学）这样的学科，你会听到人们将“还原主义者”当作一种侮辱性的字眼来使用，甚至在科学家当中也是这样。（例如，我在其中作了近40年教授的加州理工学院就常被人揶揄地称作还原主义者；事实上，我在对学院某些方面的不足表示遗憾时，也可能使用过这一术语。）怎么会是这样呢？其论据又在哪里呢？

问题的核心在于人类心理学依然值得在其自身层次开展研究，尽管理论上它可以从神经生理学、神经传递质的内分泌学等等学科导出。跟我一样，许多人都认为，在心理学与生物学之间建构阶梯时，最好的策略是不但要从底部向上，而且要从顶部往下进行考察。但这一见解并没有得到一致的认同，比如在加州理工学院就是这样，那里很少开展人类心理学研究。

在开展生物学和心理学研究，并致力于建构两者之间的阶梯的地方，生物学这方面强调的事物是脑（及神经系统的其余部分，内分泌系统，等等），而心理学方面强调的是意识——也就是大脑及相关器官活动的现象学显露。每个阶梯都是一座脑-意

识桥梁 (brain - mind bridge)。

加州理工学院研究的主要是脑 (brain)，意识 (mind) 方面的研究被忽视了，有一些圈子里甚至连“意识”这个词都受到怀疑（我的一个朋友称之为 M - 字）。但是几年以前学院开展过重要的心理学研究，特别是心理生物学家罗杰·斯佩里 (Roger Sperry) 和他的同伴在关于人脑的左、右两部分的智力关联方面做出过著名的研究。他们研究了那些由于事故或癫痫病手术致使连接左、右两半脑的胼胝体被切的病人。科学家已经发现，左半脑倾向于主管语言功能和躯体右半部分的运动，而身体的左半部分通常由右半脑控制。例如，他们发现，一个被切去胼胝体的病人将不能用言语表达与身体左半部分有关的信息，而一些间接的证据表明他拥有那方面信息。

当斯佩里随着年龄的渐增而不那么活跃时，他所开创的研究由他原来的学生和博士后，以及许多新人在其他学校继续进行。进一步发现的证据表明，左半脑不仅在言语，而且在逻辑和分析方面具有优势，而右半脑则在非言语交流、语言的情感方面以及像面容识别这样的整体性任务方面具有优势。一些研究者将直觉与分辨大图像 (big picture) 的功能与右脑联系了起来。不幸的是，在通俗化的过程中，那些结果中有许多被夸大其辞和曲解了，而且，大部分讨论都忽视了斯佩里如下的警告性评论，即“未受伤的正常大脑的两个半脑，通常是作为一个整体在发挥作用……”然而，新的发现是相当惊人的。我对深程度的后续研究尤其感兴趣，例如，业余爱好者通常主要用右脑听音乐，而专业音乐家则主要是用左脑听，这种说法我认为是真实的。

集中于机制或解释——“还原主义”

为什么如今的加州理工学院，在心理学方面的研究进行得如此之少呢？诚然，学校太小，不可能面面俱到。但是为什么进化论生物也研究得很少呢？（有时我开玩笑说，一个特创派办的学

院 (creationist institution) 其研究范围也很少这么狭窄。) 为什么生态学、语言学或考古学都研究得这么少呢? 人们可能会由此猜想, 这些学科也许有某些共同特征, 这些特征妨碍着我们大多数的教授。

加州理工学院的科学研究计划偏向机制、基本过程及解释等方面的研究。当然我是同情这一方式的, 因为它也是基本粒子物理研究的特点。的确, 这种强调基本机制的研究方式, 已使许多领域取得了巨大的成就。本世纪 20 年代, 当摩尔根 (T. H. Morgan) 正在研究果蝇基因时, 他被请到加州理工学院, 在这里他发现了生物分裂, 从而奠定了现代遗传学的基础。40 年代来到加州理工学院的德尔布吕克 (Max Delbrück), 成为分子生物学的奠基人之一。

如果一门学科被认为描述性与现象性太强, 还没有到达可研究其机制的阶段, 那么我们的教授们就会认为它还不能登上“科学”的殿堂。如果加州理工学院在达尔文时代就已存在, 而且带有与上述同样的倾向, 那么它会将他聘为教授吗? 尽管他取得了很大的成就, 但他毕竟在阐述其进化理论时, 并没涉及到多少基本过程。从他的著作中可以看出, 如果非要解释变异的机制, 他可能宁愿选择错误的拉马克观点 (拉马克主义认为, 将连续几代的老鼠都砍去尾巴, 那么将会导致一个无尾鼠群的形成, 或者说, 长颈鹿的长颈可解释为祖先几代为了够着黄刺槐而努力伸长脖子造成的)。可是, 他对生物学的贡献是非常巨大的。尤其是他的进化理论为这样一个简单的统一原理奠定了基础, 即, 所有现在的生物均由同一祖先进化而来。这与过去普遍流行的物种稳定的观点形成多么鲜明的对比, 在过去的那一观点中, 每一物种都被认为是由超自然方式特创的。

即使我也认为像心理学这样的学科还够不上称为科学, 但我仍然愿意从事那些领域的研究, 以使自己能够分享使它们变得更加科学而获得的乐趣。除了赞成自下而上地在各学科之间建构阶梯——从更基本的和解释性的学科到较不基本的学科——这样一

个通常使用的规则以外，在许多情形（不光是心理学情形）下，我也支持从上到下的方法。这种方法从识辨较不基本的层次上的重要规律开始，到后来逐渐地理解下面更基本的机制。但是加州理工学院校园中弥漫着一种强烈的偏见，它偏向于已导致大多数伟大的成就、从而为学院赢得盛誉的自下而上的方法。可这一偏见现在却使学校招致了还原主义这一具有贬损意义的名声。

诸如心理学、进化生物学、生态学、语言学和考古学这样的学科均涉及到复杂适应系统。它们都在圣菲研究所的研究范围之内，而且大量的重点放在那些系统之间的相似性，以及在各自层次上研究这些相似性的重要性方面，而不仅仅是将它们作为更基本的科学学科所衍生的结果。从这一意义上来说，圣菲研究所的成立有抗议还原主义泛滥的一面。

从夸克到美洲豹的简单性与复杂性

虽然我认为加州理工学院忽视大多数“有关复杂性的科学”是一个严重的错误，但我还是对他们在基本粒子物理学和宇宙学这两门涉及寻找宇宙基本定律的最基本的学科方面所给予的支持，感到由衷高兴。

现代科学的一个重大挑战是沿着阶梯从基本粒子物理学和宇宙学到复杂系统领域，探索兼具简单性与复杂性，规律性与随机性，有序与无序的混合性事物。同时我们也需要了解，随着时间的推移，早期宇宙的简单性、规律性及有序性怎样导致后期宇宙中许多地方有序与无序之间的中间条件的形成，从而使得诸如生物这样的复杂适应系统及其他一些事物的存在成为可能。

为了做到这些，我们必须从简单性与复杂性的观点来考察基本物理学，并弄清楚，对于具备复杂适应系统进化条件的宇宙，其规律性与随机性模式的形成，宇宙的初始条件与量子力学的不确定性以及经典混沌的不可预测性各起着怎样的作用。

第二篇 量子宇宙

第十章 量子宇宙中的 简单性和随机性

物质和宇宙的基本定律今天处于什么情形？有多少已经完善地建立起来了？还有多少仍是推测？还有，这些定律怎样看待简单性和复杂性或规律性和随机性？

这些基本定律要服从量子力学的一些原理，而且在我们思考的每一阶段我们都要涉及量子近似。量子力学的发现是人类最伟大的成就之一，但它也是人类智力最难掌握的困难之一，即使像我们这些几十年来天天用到它的人，也觉得非常困难。它经常违背我们的直觉，或者说是违背我们在忽略量子力学行为情形下建立的直觉。这种情况使我们更有必要探究量子力学的意义，特别是在考察近来有关量子力学的思维方式的进展以后，这种必要性显得更迫切了。作了这种考察后，我们也许会比较容易明白，为什么我们的直觉似乎对某些重要的东西不予关注。

物质组成宇宙，不同的基本粒子如电子、质子组成物质。这些基本粒子缺乏个性——宇宙中的电子都相同，所有的质子同样可以相互转换。不过，任何粒子可以占据无数不同“量子态”

(quantum states) 中的一个。基本粒子可分两大类。一是费米子 (Fermions)，例如电子，它们遵守泡利不相容原理 (exclusion principle)，即同一类的两个粒子不可能同时占据相同的量子态；另一类叫玻色子 (Bosons)，例如光子，它们不遵守不相容原理，即同一类的两个或两个以上的粒子偏好在同时占有相同的量子态。光子的这种特性使激光的运作成为可能，在激光里给定态的光子可以激发更多相同态的光子发射。所有这些光子具有相同的频率和沿相同的方向运动，形成激光束。“激光” (laser) 实际上是“辐射受激发射光放大” (light amplification by stimulated emission of radiation) 的缩写。

玻色子由于喜欢挤在相同的量子态使密度增加，这使得它们的行为十分像经典场（如电磁场和引力场这样的场）。因此，玻色子粒子可以看成是这些场的量子（量子化的能量小包）。电磁场的量子是光子。同样，理论要求引力场也有相应的量子，这种玻色子称为引力子 (graviton)。事实上，任何基本的力都必然有与之相关联的基本粒子，即相应场的量子。有时候量子被称为相应力的携带者。

当我们把物质描述为由基本粒子（即费米子和玻色子）组成时，我们应该强调在某些条件下玻色子的行为更像场而不像粒子（例如一个电荷周围的电场）。费米子也可以用场来描述，虽然这些场的行为与经典场不同，但在某种意义上都与力相关联。

所有的物体都具有能量，所有的能量都与物质相关联。当人们不经意地提到物质转化为能量（或相反）的时候，他们的意思只不过是说某种物质转变成为另外一种物质。例如，一个电子和一个称为正电子的相关粒子相遇时就转化为两个光子，这个过程经常被称为“湮灭” (annihilation)，有时甚至说为“物质湮灭给出能量”。但实际上这仅仅是物质之间的转换，能量形式之间的转换。

标准模型

所有基本粒子（除了理论上需要的引力子）在当今都暂时用一种所谓的标准模型（standard model）来描述。后面我们将对它作一点深入讨论。虽然标准模型的某些性质尚未被实验证实，但它与观察却似乎非常相符。物理学家们曾经希望能在高能粒子加速器上（如在德克萨斯部分完成的超导超级碰撞器 SSC）验证标准模型，但美国国会否决了这个计划，原因是认为它明显违背了人类文明。现在验证这一基本理论思想的唯一希望，只能依靠设在瑞士日内瓦附近 CERN 的能量较低的加速器。不幸的是，它的能量又太低了。

我们这些建立标准模型的人，自然非常为它骄傲，因为它从大量扑朔迷离的现象中引出了许多简单性。但仍然有许多理由认为，它并不是基本粒子的终极理论。

第一，各种力有十分相似的形式，它要求用一种理论统一它们，在这统一的理论里这些力有同样基本的相互作用但却有不同表现；但在标准模型里，这些力却要看成是不同的力，不能统一。第二，这个模型不够简单；它包含有 60 种以上的粒子和它们之间大量的相互作用，而且对所有这些又没有解释。第三，这个模型包含有一打以上描述这些相互作用的常数（包括产生不同质量和不同种类粒子的常数）；有这么多在原则上不能计算的重要常数，这就很难认为这个理论是基本的。最后，引力没有包括进去，任何想把引力以简明方式引进这个模型的设想，都导致灾难性的困难：一些物理量计算的结果最终都会出现无限的修正，致使它们毫无意义。

所谓的大统一理论

基本粒子理论家们试图用两种办法克服这些缺点。最直截了

当的方法是把标准模型推广到有些人称之为的一种“大统一理论”(grand unified theory)。不过这个名称有点名不符实。现在让我们看一看，这种推广如何解决前面提到的4个问题。

第一，需要统一的标准模型中，其相互作用在高能情形下事实上可以看成是统一的，但需弄清楚的是为什么在能量较低的情况下，这些相互作用又各不相同了。第二，所有的基本粒子都可以分成不多的几组，每一组的成员关系密切；这样，在简单化方面可以说取得了很大成就，即使不少种类的粒子还在不断增多(例如有些新粒子的质量非常之大，以至在可预见的将来无法观察到)，也没有影响这种简单的分类。第三，这个理论所包含的任意常数比标准模型还要多，而且这些常数在原则上也无法计算。最后，引力仍然不能包容进去，困难和以前完全一样。

这样的—个理论在一个广泛的能量域里，可能近似有效，但上述的第三和第四点使我们明白，这个理论还不能看成是基本粒子的基本理论。

爱因斯坦的梦

基本统一理论的探索引向了超越标准模型的第二条道路。这使我们回想起爱因斯坦的梦想：他想创建一种场论能自然而然地将他的广义相对论的引力理论和麦克斯韦的电磁理论统一起来。在他晚年时期，爱因斯坦提出了许多组方程，他声称它们可以完成统一大业，但不幸的是这些方程组都只是纯数学的，不能合理地描述引力和电磁力相互作用。1979年在耶路撒冷庆祝爱因斯坦诞生百年纪念大会上，我发现在一枚特殊纪念币的反面把这些错误的方程铸上去了，我对此表示惋惜。一个科学家在年轻时创立了那么美丽、正确、关键性的方程，老年却提出了这么些错误的方程，实在令人扼腕叹息。我还时常困惑，爱因斯坦老年的照片、塑像到处都是(例如在华盛顿国家科学院广场上的塑像)，但这个年老的爱因斯坦再没有作过什么重要的贡献，而他年轻时

不仅作出了所有惊人的发现，还穿戴整齐、英俊潇洒。

爱因斯坦建立统一场论的试图最终失败了，这不仅仅由于他的思考技巧在退步，而且也由于他的研究有某些特殊的缺陷。除了其他原因以外，他忽略了这个统一理论中3个重要的特性：

1. 除了引力场和电磁场以外还存在其他的场（一般说爱因斯坦也知道还应该有其他力存在，但他没有试图去描述它们）；

2. 我们不仅仅要讨论由量子力学揭示的由玻色子（如光子、引力子）组成的场，而且应该把费米子组成的场考虑在内（爱因斯坦认为，比如说电子，可以通过什么方法从方程中产生出来）；

3. 统一场论必须在量子力学的框架里才能建立（虽然爱因斯坦曾为量子力学作了一些奠基性工作，但他从不接受量子力学）。

但是，我们理论物理学家都曾被爱因斯坦的梦激励过，不过我们在一种新的形式下思考统一场论：一个统一的量子场论不仅包含光子、引力子和所有其他基本的玻色子，以及与它们相关联的电磁场、引力场和其他一些场，还应该包含如电子这样的费米子和它们的场。这样的一个理论应该包含在一个简单的公式里，这个公式可以对大量基本粒子和它们相互作用的多样性作出解释，并且在适当近似的条件下，能引出爱因斯坦的广义相对论引力方程和麦克斯韦电磁学方程组。

超弦理论——或许可以实现的梦

上面所说的梦，现在也许可以实现了。一种称为“超弦”（superstring）的新型理论似乎具有完成统一的一些正确特性。特别是“杂化超弦理论”（heterotic superstring theory），它是所有基本粒子和相互作用的统一量子场论最有成效的候选理论。

超弦理论源自一种靴带原理（bootstrap principle）的思想。有一句古老的格言说，人可以用向上提自己的靴带的办法把自己提到空中。这意思是说一组基本粒子可以看成是相同粒子联合成

的一种自洽态。所有的粒子都应看成是组成成分，所有的粒子（即使在某种意义下费米子也不例外）都应看成是把各组成成分联在一起的力场的量子；还有，所有的粒子都要以组成成分的束缚态出现。许多年以前，当我在休斯飞机公司对一位听众描述这种想法时，这位后来成为同步卫星计划领导人的工程师——罗森（Harold Rosen）——问我，超弦理论是不是有点像他们在制作一个电路时试图对一种干涉信号所作的解释？他们假定信号一直存在，而且证明它们是自己产生的。这种解释十分成功。我表示同意，靴袞的思想的确有些与此类似：如果假定粒子存在，它们就会产生把它们连在一起的力；最后出现的束缚态就是同样的粒子，它们与携带力的粒子是相同的。这样的一个粒子系统，如果存在就是自行产生的。

超弦理论的最初形式是施瓦兹（John Schwarz）和勒伏依欧（André Neveu）于 1971 年提出来的，当时得到雷蒙德（Pierre Ramond）的某些支持。虽然这个理论在当时看来牵强附会，我还是把施瓦兹和雷蒙德请到加州理工学院，我认为超弦如此之美妙，那一定有一些有价值的东西。在接着 15 年或更多的年头，施瓦兹与不同的合作者，其中特别应该提到的是谢尔克（Joel Scherk）和格林（Michael Green），进一步发展了这个理论。

开始这个理论仅仅只应用到一小类相同的粒子上，理论家们试图用靴袞原理描述它们。只是到了 1974 年，谢尔克和施瓦兹才认为超弦理论可以用来描述所有的基本粒子。他们之所以有这种自信，是因为他们发现这个理论预言了引力子的存在，这当然也就预言了爱因斯坦的引力的存在。此后大约 10 年时间，普林斯顿大学的 4 位物理学家建立了一种称为杂化超弦理论的特殊理论形式。

超弦理论，特别是其杂化形式，可能正是长期寻找的统一量子场论。在适当的近似时，它自然而然地蕴涵着爱因斯坦的引力理论。而且，当它把爱因斯坦的引力理论和其他场的理论与量子场论结合在一起时，不会出现通常都有的无限大的困难。它还可

以解释为什么基本粒子有这么多的多样性。不同种类粒子的数量实际上是无穷的，但在实验室里只能发现一定数量（例如几百种）、质量足够小的粒子。而且，至少从表面上看，这个理论不包含任何任意常数或大量的粒子和相互作用，只有在更深入考查时，才会可能有一些任意性出现。最后，超弦理论出自一个简单而美妙的自洽原理，即最初人们称之为靴祥的思想。

不是解决一切的理论

在所有有关杂化超弦理论重要的问题中，有一个使我们特别感兴趣：假定它是正确的，它真能解决所有的问题吗？有些人认为它能解决一切问题，甚至用上了 TOE (Theory of Everything) 这个缩写词。这种说法是不对的，除非将“所有一切” (everything) 仅仅意指基本粒子和它们之间相互作用的描述。理论仅靠它自身不可能告诉我们有关宇宙和它所包含的物质的一切。我们还必须有其他形式的信息。

初始条件和时间之箭

其他信息中的一个，就是宇宙在开始或临近膨胀时，宇宙的初始条件如何。我们知道宇宙膨胀已有 100 亿年。天文学家们利用大倍数望远镜观察远距离银河系的星团，可以看到这种令人惊诧的膨胀；但当我们观察近处时，这种膨胀根本观察不到。我们的太阳系不膨胀，我们的银河系和从属它的星团也不膨胀。其他银河系和星团同样不膨胀。但是，不同的星团都在向后退行，而这正好显示出宇宙的膨胀。有人把它比为烤葡萄面包。在酵母粉的作用下，面包膨胀了，但葡萄（银河系的星团）虽然相互离开了一些，但可以认为葡萄本身并没有膨胀。

宇宙从开始膨胀以后，其行为很明显地不仅仅决定于组成宇宙的粒子所遵循的定律，而且也决定于其初始条件。初始条件只

在深奥难懂的物理学和天文学问题中才出现吗？完全不是这么回事！其实它对我们日常生活的观察有巨大影响，特别是初始条件决定了时间之箭。

我们想像在看一段影片，一颗陨星飞快地坠入地球的大气层，这时它会由于高热而在天空划出一道耀眼的光芒。陨星的大部分烧成了灰烬，但也有些不同大小的陨石冲进地球的大地里。如果我们把电影胶片往回倒，我们将会看到一块岩石，部分埋在土地中，然后它又升到高空，而且在大气中作弧线运动时大小和重量不断增加，最后又大又冷的陨星离开地球飞向天空。影片中时间倒退的顺序，实际上是不可能出现在现实中出现，我们可以立即断言那是在倒影片胶带。

这种宇宙中未来和过去的不对称性，就是人们熟知的时间之箭。有时我们根据不同的方面来分立地讨论这种不对称性，并因而冠以不同的时间之箭的名称。但是，它们都是相关联的，它们最初的起源都相同。那么，这种起源是什么呢？

时间之箭可以用基本粒子的基本定律解释吗？如果改变方程中时间变量的符号，描述这些规律的方程的形式仍然不变，我们就说这个方程对于未来和过去是对称的。如果改变时间的符号使方程的形式发生了变化，那么就说该方程对未来和过去是不对称的，或者说违背时间对称。这种违背在原则上可以说明时间之箭。事实上我们知道这种小的违背存在，但把这种效应作为引起时间之箭的一种普遍现象来加以肯定，又有以偏概全之嫌了。

如果我们沿时间的两个方向观看，我们会发觉其中一个方向在 100 或 150 亿年以前，宇宙处于一个非常特别的状态。这个时间的方向我们称之为“过去”（past），而另一个方向则称为“未来”（future）。在对应于初始条件的状态中，宇宙非常小，但这个“非常小”也还是不能完满描述这种处于特别简单的状态。在很远的未来，宇宙停止膨胀，并开始收缩，最后宇宙又会变得非常非常小，但我们完全有理由相信，宇宙的最终态将与初始态十分不同。过去和未来的不对称性因之也保持下来。

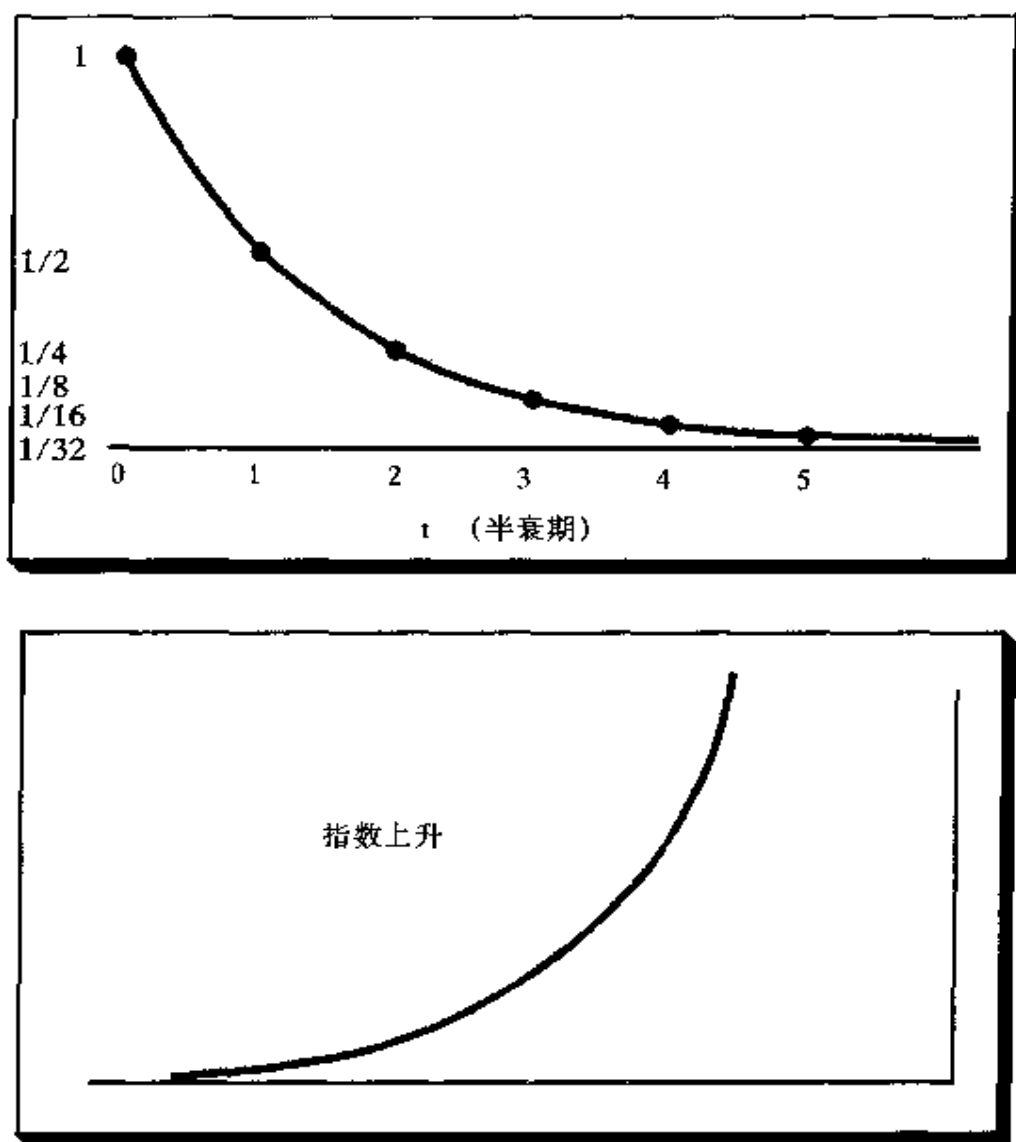
初始条件的一个候选理论

既然出现了一个可行的基本粒子统一理论，那么我们就有理由要求有一个近似可取的宇宙初始条件的理论。实际上有一个这样的理论，它是 1980 年由哈特尔 (James Hartle) 和霍金 (Stephen Hawking) 提出来的。霍金喜欢称这个理论为“无边界的边界条件” (no-boundary boundary condition)。这是一个很贴切的名称，但对这个建议特定的“后继信息”，它并没有反映出来。如果基本粒子确实需要一个统一理论 (哈特尔和霍金并没有明确地假定)，那么它们的初始条件的近似修正形式，就能够从统一理论的原理中计算出来，而且，基本粒子和宇宙所需的两个物理学基本定律，就成为一个单独的定律。

不是一切，只是历史的概率

不论哈特尔-霍金的想法是否正确，我们仍可提出下列问题：如果我们确定了基本粒子的统一理论和宇宙的初始条件，那么我们在原则上能够预言宇宙和宇宙中一切事物的行为吗？答案是否定的，因为物理学诸定律都是量子力学的定律，而量子力学是非决定论的，它只允许理论作出概率性的预言。物理学的定律在原则上只允许计算各种不同宇宙历史的概率，这些不同的宇宙历史描述由于给定了初始条件而发生不同的事件。实际上发生的序列事件的信息只能从观察中收集到，因此这些信息是基本定律自身外的附加的东西。由此可知，基本定律不可能提供解决一切的理论。

量子理论的概率性质可以用一个简单的例子说明。一个放射性原子核有一种所谓的“半衰期”，即在这段时间内它有 50% 的机会衰变。例如 ^{239}Pu (钚的最常见同位素) 的半衰期是 25000 年，这就是说一个今天还存在的 ^{239}Pu 还能生存 25000 年的机会



上图:放射性核在时间 t 的衰变后,剩下部分的下降
指数曲线;

下图:上升指数曲线

图 10-1 深度与时间的关系

是 50%; 生存 50000 年的机会是 25%; 生存 75000 年的机会是 12.5%, 等等。量子力学的自然特性就是说, 对于一个给定的 ^{239}Pu 核, 我们所能知道的信息就是它将会衰变, 但我们不能预言它衰变的精确时刻, 我们只能知道一个对时间的概率曲线。在我们给出的图中有一条是下降的指数曲线, 一条是上升的指数

曲线。一条指数曲线在相同的时间间隔里，在下降时给出一个几何级数 $1/2$ 、 $1/4$ 、 $1/8$ 、 $1/16$ ……，在上升时则给出 2 、 4 、 8 、 16 ……上升的几何级数。

在发生辐射时，我们对衰变不能作出精确的预言，衰变的方向更是完全不能预言。假定 ^{239}Pu 核处于静止状态，并将分裂成两个带电的碎片，一个比另一个大得多，而且向相反的方向运动。那么，对于碎片来说，所有的方向都应该机会均等，我们没有办法说明碎片将向哪个方向运动。

如果对一个原子核的未来都有这么些东西不知道，那么对整个宇宙，即使给出了基本粒子统一理论和宇宙的初始条件，该有多少东西基本上无法预言！远远超出这些假定的简单原理之外，宇宙的每一个可选择的历史还要依赖于不可置信的大量偶然事件的结果。

由冻结偶然事件而得到的 规律性和有效复杂性

那些冻结的偶然事件（frozen accidents）将有一些由量子力学来确定的偶然结果，这些结果帮助我们确定一些独特银河系（如我们的银河系）的性质，确定一些特殊的恒星和行星（如太阳和地球）的性质，确定地球上生命以及我们行星上一些进化的特殊物种的性质，确定一些特殊组织如我们人类自身的性质，以及确定人类历史事件和我们个人生活的性质。任何人的基因型都要受到大量的量子偶然事件的影响，不仅仅古老细菌的原生质会因此而发生突变，而且这些量子偶然事件甚至会影响到抹香鲸的受精卵。

宇宙的每一个可供选择的历史其算法信息量（AIC），受简单的基本定律的影响十分微小，但却会受到进化道路上量子偶然事件很大的影响。应指出的是，并非仅仅宇宙的 AIC 受这些偶然事件的支配。虽然它们只是偶然事件，但它们的效应却强烈地

影响着复杂性。

宇宙有效的复杂性是一种简明描述了宇宙规律性的长度。像AIC一样，这种有效复杂性也只受基本规律少许影响，大部分影响来自“冻结的偶然事件”引出的大量规律性。这些偶然事件的特殊后果有各种各样长期的影响，而这些影响因来自于共同的起源而都相互关联。

某些这样的偶然事件其影响极为深远。整个宇宙的性质就受到临近宇宙膨胀开始时刻的偶然事件的影响。地球上生命的性质就与大约发生在40亿年前的偶然事件有关。一旦结局特定化以后，这样一个事件的长期影响就可能具有一种规律性的特征，但决不在最基本的层次上。一条地理学、生物学或人类生理学的定律可能由一个或几个放大的量子事件引出，每一个放大的量子事件可能有不同的结局。这些放大经过各种机制才能发生，其中包括混沌（chaos）现象，在某些情形下，混沌现象会出现输出对输入有无限大的敏感性。

充分理解偶然事件的意义，对深入理解量子力学的意义是十分必要的，它将告诉我们在描述大自然时，机遇起了一种基本的作用。

第十一章 量子力学的当代观 (量子力学和经典近似)

当量子力学刚提出来的时候，人们受到了巨大的震撼，因为它的概率特性和经典物理学的必然性完全相反。在经典物理学里，我们在原则上可以知道初始情形精确和完整的信息，由这些信息我们可以得到正确的理论和精确、完整的结论。这种决定论完全不适用于量子力学，但在很多条件下可以近似地应用，我们把这些可近似应用的领域称为准经典性领域，在这些领域里经典物理学近似地正确。那些只涉及重物体 (heavy objects) 行为的范围，大致上可以称为准经典性领域。例如，为任何实用的目的，行星绕太阳的运动可以计算出来，不需要量子修正，对这样的问题量子修正可以完全忽略不计。如果准经典领域没有如此重大意义，那么，物理学家就不可能发展经典物理学，也不可能将它用来解决任何问题，而经典理论物理学家如麦克斯韦和爱因斯坦，也不可能取得惊人的成功，不可能预言观测的结果。这是另一个例子，说明当新的范式 (paradigm, 如库恩所称呼的) 被采纳后，旧的范式并不会抛掉，在适当的极限情形下还仍然具有有

效的近似性（这就像牛顿的引力理论在相对于光速很低的速度情形下，虽然对于爱因斯坦引力理论是一种近似，但却仍然具有巨大的应用价值）。但是，经典物理学只是一种近似，而量子力学在现在看来才是精确正确的。量子力学于1924年发现后，虽然已经过去了几十年，但只是到现在才接近了一个真正令人满意的解释，这个解释使我可以深刻了解，为什么日常经验中准经典领域是大自然更深层的量子力学特性的结果。

被测系统的量子力学近似

当量子力学的发现者最初阐述量子力学时，它经常被描述为受到严格限制和以人类为中心（anthropocentric）的样子。这种描述方式一直延续到今天。这种阐述大致上是这样的：某些实验（如一种特定核的辐射衰变）被同样地一再重复，实验的结果每次都由一位物理学家用某种仪器作了最好的观测。物理学家和仪器被假定在所研究系统之外，而且这个假定被认为十分重要。物理学家把实验中出现的各种可能结果都记录下来（例如衰变的时间）。当实验次数无限制增多时，记录下来的东西就会向不同结果的概率接近，这个概率就是量子力学理论可以预言的东西。作为时间的函数，辐射衰变的概率与经历不同时间间隔后留下的未衰变核的数额有密切关系，如图10—1所示。衰变的概率归结为一条近似的曲线。

量子力学的这种初始的解释（即限制在外部的观测者要多次重复实验）由于太特殊，因此不能认为它表达了量子力学的基本特征，特别是现在意识到量子力学必须用于整个宇宙，就更不能这样认为了。这种初始解释并没有错，但它只能应用到那些需要描述的情况。而且，在更广泛的意义上说，这种解释必须认为不仅只特殊，而且是近似的。我们宁愿把这种解释视为“被测系统的量子力学近似”。

现代近似法

为了描述宇宙，很明显地需要一个更普遍的量子力学诠释。因为在观测宇宙时，没有外部的实验工作者和外部的仪器，而且我们也没有机会重复（宇宙不可能有复制品）。无论怎么说，宇宙也许不会不关心在某个模糊不清的行星上，人类进化到可以研究宇宙的历史；宇宙将继续遵循量子力学定律，而不会考虑物理学家的观测。这就是为什么我认为量子力学的现代解释在最近几十年发展了的一个原因。另外一个主要原因，是我们需要清楚地了解对我们周围世界的两种描述（量子力学的和近似经典的）之间的关系。

在早期量子力学的讨论中，人们常常暗示，有时是明确地说，除了量子力学之外还有一个经典的领域，因此，基本物理的理论除了量子力学的以外，有时还需要经典定律。对于由经典物理培养出来的一代人来说，这种方案似乎令人满意，但对今天我们中的许多人来说，这种方案就显得奇怪，而且也不必要。在量子力学的现代诠释中，人们提出，准经典领域出现在量子力学定律里，其中包括宇宙开始膨胀时的初始条件。要想了解这一切是如何发生的，是一个重要的挑战。

最先提出现代近似法的是已故的艾弗雷特第三（Hugh Everett III），他是惠勒（John A Wheeler）在普林斯顿的研究生，后来成了美国五角大楼武器系统评估小组的成员。从他以后，有许多理论物理学家研究这个内容，其中有哈特尔和我。哈特尔在加州大学圣芭芭拉分校和 SFI 工作过，他是一位优秀的理论宇宙学家，还是一位研究爱因斯坦引力理论的专家。早在 60 年代当他还是加州理工学院我的博士生时，他的学位论文就是研究基本粒子理论。后来，他和霍金写了一篇论文“宇宙的波函数”（The Wave Function of the Universe），这篇日后大有作为的文章对量子宇宙场的建立，起了重大作用。1986 年以后，哈特尔和

我一直在一起研究，想弄清如何表达量子力学，特别是在有关准经典领域里。

我们认为艾弗雷特的工作有重要价值，但我们又相信还有很多的工作等待我们去干。像其他成果一样，艾弗雷特对词汇的选择和后来一些人对他的工作的注释，造成了混乱。例如，他经常用“多世界”（many world）来进行解释，但我们相信，多世界的真正意思应该是“多种宇宙可选择的历史”。除此之外，这些多世界被认为是“完全相等的真实”，我们认为把它解释为“所有的历史从理论上看来都是相同的，但它们有不同的概率”，这将更加明确而不会引起迷惑。使用我们建议的语言，讲的还是大家熟悉的概念，即一个给定的系统可以有不同的历史，每一种历史有它自己的概率；没有必要使人们心神不安地去接受都具有相同真实性的多个“平行的宇宙”（parallel universes）。一位有名的非常精通量子力学的物理学家，他从艾弗雷特阐述的诠释者的诠释中得出一个推论：接受这个理论的任何人都将希望在俄罗斯赌盘机上进行豪赌，因为在某些“相同真实”的世界里，玩赌的人不仅活着，而且成了富翁。

另一个语言学上的问题是，艾弗雷特在大部分连接关系上避免使用“概率”这个词，他宁愿使用人们不太熟识但在数学上等价的观念“量度”（measure）这个词。哈特和我认为这样毫无益处。而且，除了词汇以外，艾弗雷特留下了许多重要的问题没有回答，而且主要的挑战并非语言这类问题，而是要填充我们在理解量子力学时出现的那些空隙。

哈特和我都是一个国际理论小组的成员，这个小组试图用不同的方法来建构量子力学的现代解释。其中有些人作出了有特殊价值的贡献，如格里菲斯（Robert Griffiths）和欧姆内斯（Roland Omnès），后者和我们一样相信历史的重要；还有，朱斯（Erich Joos）、蔡赫（Dieter Zeh）和朱里克（Wojciech Zurek），朱里克常常会提出许多不同的见解。量子力学用历史进行表述，是费曼（Richard Feynman）提出的，而这又是建立在狄拉克早

期的工作上, 这种表述不仅有助于弄清量子力学的现代解释, 而且对于在量子力学中考虑爱因斯坦引力理论时十分有用, 这正如量子宇宙学中的情形一样。时空几何学将被视为量子力学的不确定性的主题, 而奠基在多历史上的方法, 对这种情形将会作出特别好的处理。

宇宙的量子态

任何处理量子力学的方法都少不了一个基本概念: 量子态 (quantum state)。我们现在考虑一种简化了的宇宙图像: 各个粒子只有两种属性——位置和动量, 也不考虑所有粒子在一给定型的不可区别性 (例如所有电子的可交换性)。在这种情形下, 整个宇宙的一个量子态意味什么呢? 我们最好在考虑整个宇宙之前, 先讨论一个单个粒子的然后是两个粒子的量子态。

在经典物理学里, 我们将理所当然地要同时给出特定粒子精确的位置和动量, 但在量子力学中由于不确定性原理, 我们知道这是不可能的。粒子的位置可以精确地确定, 但它的动量将完全不能确定; 这种情况我们用一个位置确定的状态来描述单个粒子的一种特殊的量子态。在另一种量子态的情形中, 动量可以精确给出, 但位置却完全不确定。除这两种量子态以外, 单个粒子还有无限种其他可能的量子态, 在这些量子态里位置和动量都不能精确地给出, 对应于每一种量子态只有一种涂抹成一片的概率分布。例如, 氢原子由一个电子 (带负电荷的) 位于一个质子 (带正电荷的) 的电场中组成, 这个电子可以处于能量最低的量子态, 这时电子的位置处于原子尺寸大小的空间中, 而它的动量也就有了相关的分布。

现在考虑有两个电子的“宇宙”。从理论上说, 在这种状况下每个电子的量子态有无限的多, 但是实际上这种情形不会常常发生, 因为这两个电子要相互作用, 特别是它们之间有电的排斥力。例如氦原子, 它由两个电子和两个带正电荷的核组成, 这两

个电子还处于核的正电场之中。在核原子最低的能态下，每个电子自身不可能有无数个量子态，尽管我们有时把这种情况作为一种近似来处理，但实际上是不可能的。由于电子相互作用的结果，它们共同的量子态只能是两个电子彼此相关状态的一种。如果你只对其中一个电子感兴趣，你可以把第二个电子的所有位置（或者动量或者其他属性的值）“加起来”（sum over），那么你感兴趣的那个电子就不再处于无限个（纯）量子态，而只有对于各种纯单个电子量子态的一组概率。这时，你感兴趣的电子就被说成是处于“混合量子态”（mixed quantum state）。

现在我们可以直接讨论整个宇宙的量子态了。如果宇宙处于一种纯量子态，这种量子态将是宇宙中所有单个粒子彼此相关联的状态。如果我们把宇宙某些部分所有状况全部加起来，那么宇宙剩下的（即未加进去的）部分就处于混合量子态。

宇宙作为一个整体可能处于一个纯量子态。哈特尔和霍金在作了这种假定时，提出了纯量子态的一种特殊形式，它存在于临近宇宙开始膨胀的时刻。如他们早期假说所规定的那样，宇宙的初始量子态是由基本粒子的统一理论来表述的。此外，这同一统一理论可以决定量子态如何随时间而变化。但是，一个整个宇宙量子态的完整而详尽的说明，即不仅是初始而且是所有时间的量子态说明，仍然无法为量子力学提供一种解释。

宇宙的量子态好像是一本书，它包含有对无穷尽各种问题的答案。但是，如果没有一张表列出这些要问的问题，这本书实际上没有用处。建立量子力学的现代解释，用的方法是只对宇宙量子态提出恰当的问题，然后加以讨论。

既然量子力学是概率的而不是决定论的，那么要问的这些问题必然是有关概率的问题。哈特尔和我，像格里菲斯和欧姆内斯一样，利用这样的事实，即所问的问题最终总是与宇宙可选择的历史（alternative histories）有关。谈到“历史”（history），我们并不强调过去而忽视将来，也不意味着我们主要指人类历史那种记录下来的东西。历史仅仅是一种对事件的时间序列——过去、

现在或未来——的叙述。关于可选择历史的问题可能是以下样式：“这个特定的而不是另一个宇宙历史出现的概率是什么？”或者是“断定了一种宇宙历史以后，那么，另外那些附加陈述的概率又是什么？”后一个类型的问题常常以熟悉的形式出现：“断定了过去和现在，那么，会成为真实未来的那些陈述的概率到底是什么？”

赛马场上其他可选择的历史

在赛马场上我们会碰上一个概率问题，这与我们称之为真正的赌注差额（true odds）有关。如果一匹赛马获胜的真正差额是3对1（即赌输时付3，赌胜时付1），那么那匹马获胜的概率是 $1/4$ ；如果真正的差额是2对1，那么概率是 $1/3$ ，等等。（当然，差额是赛马场的喊价，并不是真正的差额，也不能据此得到真正的概率。以后我们还会回到这个问题。）如果有10匹马参赛，每一匹都有一些获胜的正概率（或者让人绝望的零概率！），如果只有一匹马获胜，那么这10个概率加起来就是1。这10个可供选择的结果互相排斥（只有1匹马获胜），也不会遗漏（总有1匹马获胜）。这10个概率有一个明显的特性，那就是它们可以相加：举例说，无论是第3或第4匹马获胜的概率，正好是第3和第4匹马单个获胜概率之和。

进一步将赛马的经验与宇宙历史进行比较，我们可以考虑一系列比赛的情形，比如说每次10匹马的比赛进行了8次。为了简单性，假定只有获胜事件（不是“前三名”或“表演”）而且每次比赛只有一个获胜者（没有并列名位）。那么，8个获胜者的名单就是一种历史，这种历史是相互排斥的、没有遗漏的，这有如每次比赛的情形一样。可选择历史的数目，是 10^8 （其中每个1代表一次比赛）的8个因子的乘积，或者说总数共有1亿之多。

不同获胜序列的概率也有同样的可加性，如同所有单个马在

一次比赛获胜的概率一样：这个或另一个特定系列的将要获胜的概率，是两个序列单独概率之和。在某种形势下，这种或另一种序列都可发生，这种形势可以称之为“联合历史”（combined history）。

我们把两个单个可选择的历史分别称为 A 和 B。可加性指出，“A 或 B”的联合历史的概率是 A 的概率和 B 的概率之和。这就是说，我明天去巴黎或留在家里的概率，是我打算去巴黎的概率和打算留在家里的概率之和。如果不遵守这种规则，就谈不上概率。

量子力学中可选择的历史

假定有一组宇宙的可选择的历史已经确定下来，而且这些历史没有遗漏而且相互排斥，那么，量子力学总是能对每一种情形赋予一个概率吗？令人奇怪的是，并不能总是如此。量子力学只能对每一对这样的历史赋予一个称为 D 的量，和提供用宇宙量子态计算 D 的一个规则。成对的两个历史可以不同，像可选择的 A 和 B；但它们也可以相同，如 A 和 A。D 的值可以由表式 D(A, B) 给出，D(A, B) 念成 A 和 B 的 D。如果成对的两个历史都是 A，那我们就得到 D(A, A)。如果它们中的两个都是 A 或 B 联合的历史，那么 D 的值就用 D(A 或 B, A 或 B) 表示。

当成对的两个历史是相同的，那么 D 的值就在 0 和 1 之间，这和概率一样。事实上，在某些条件下，D 可以解释为历史的概率。为了弄清楚这些规则，我们考察下面一些量的关系：

D(A 或 B, A 或 B),

D(A, A),

D(B, B),

D(A, B) + D(B, A)

头 3 个量的值在 0 和 1 之间，与其概率相同。最后的一个量可正可负，也可以为零，但不是一个概率。在量子力学中计算 D

的规则是：第一个量是其他 3 个量之和。但是，当 A 和 B 不同时，如果最后一个量总是零，那么 $D(A \text{ 或 } B, B \text{ 或 } A)$ 就正好等于 $D(A, A)$ 加上 $D(B, B)$ 。这就是说，在两个历史不同而 D 又总是零的情形下，一个历史和那相同历史的 D 总具有相加特性，并因此可以解释为是那种历史的概率。

第 4 个量被称为历史 A 和 B 之间的干涉项。如果在组中每一对不同的历史都不为零，那么在量子力学中，概率性就不能赋给这些历史。因为它们彼此“相干”。

既然量子力学在任何情形下能做到的最了不起的事是预言一种概率，那么当两种历史相干的情形下，量子力学就什么事也不能干了。仅仅在建构不相干的联合历史时，这些历史才有用处。

宇宙的精粒历史

宇宙的完全精粒历史 (completely fine-grained histories)，是指在时间的任何时刻都能对历史作尽可能完备的描述。对此，量子力学怎么看待呢？

我们继续利用简化了的宇宙图像，在这种图像中粒子只有位置和动量两种属性，而且在给定情形下粒子之间的不可分辨性不予考虑。如果经典决定论的物理学完全正确，那么，宇宙中所有粒子的位置和动量在任意给定的时刻里，都可以精确地给出。因此，经典动力学在原则上可以确定地预言所有粒子在未来任何时刻的位置和动量。至于混沌现象，即初始位置和动量最轻微的含糊不清，都会对未来的预言带来任意巨大的不确定性，这种情形在原则上不影响经典理论的完全决定论，它仍然是正确的，仍然可以给出完整的信息。

在量子力学里，经典物理学仅仅是一种近似，那么上述的情形又会怎么样呢？首先，一个粒子在相同时刻里有精确的位置和动量这种说法不再有意义；这是由著名的不确定性原理指出的。因此，在量子力学里简化了的宇宙在给定时刻的状况，只需给出

所有粒子的位置就行了（或者只给出所有粒子的动量，或者给出某些粒子的位置和另一些粒子的动量）。在量子力学中，一种简化宇宙的完备的精粒历史，可以由所有的粒子在所有时刻的位置来确定。

既然量子力学是概率性而不是决定论性的，所以我们可以期望得到一个对于每种精粒历史的概率。但实际情况并非如此。精粒历史之间的干涉一般不会消失，因此不能将概率赋给这样的历史。

但在赛马中，买彩票的人并不会为各系列获胜者的相干项而发愁。这是为什么呢？买彩票的人只要适当相加就可以得到真正概率，这是怎么回事呢？而量子力学在精粒层次上提供的量，在相加时却受到干涉项的阻碍，这又该怎么办？答案是：为了得到实际的概率，还必需考虑足够粗粒的历史。

粗 粒 历 史

8 匹赛马的序列不仅仅是一种隐喻，而且也可以作为宇宙一种极粗粒历史（very coarse-grained history）的具体例子。既然只考虑列在单子上的胜利者，则粗粒指的是以下几点：

1. 除了竞赛获胜的时刻以外，宇宙历史所有其他时刻均忽略；

2. 在所考虑的时刻里，只追踪进入竞赛的那些马，而忽略宇宙中所有其他物体；

3. 在这些马中，只追踪每次竞赛中获胜的马，而且除了这马的鼻尖以外，马的其余部分均忽略。

量子力学中的宇宙历史，粗粒化后其意义是说：我们只追踪某些时刻的某些事情，而且仅达到某种细节的水平上。一种粗粒历史可以看成是一类可选择的精粒历史，它们在需要追踪的特定内容上完全相同，但在不需追踪而只需相加的内容则可以有各种不同的行为。在赛马的情形下，每一种粗粒历史是这样一类的完

全精粒历史，在特定的下午、特定的跑道上，8 匹获胜马享有相同的序列，虽然这类精细历史可以在所有可能选择的、具有另外特性的宇宙历史中改变！

所有的宇宙精粒历史，可以分成许多类，每一个这样的精粒历史属于一个类，而且也仅属于一个类。这些没有遗漏和相互排斥的类就是粗粒历史（例如当 8 匹获胜赛马彼此没有关联时有不同的可能序列）。假定一给定的类仅包括两个精粒历史 J 和 K，那么粗粒历史将是“J 或 K”，意思是或是 J 或是 K 发生。同样，如果类包含许多精粒历史，那么粗粒历史将是任意一个精粒历史发生的联合历史。

数学家把这些粗粒历史称之为精粒历史的“等价类” (equivalence classes)。每一个精粒历史属于一个也仅属于一个等价类，所有这些类又看成是等价的。

我们想象宇宙中唯一的事物就是 8 匹赛马和某些数量的马蝇，而且所有的马能做的事就是取胜或不取胜。在这个过分简化以至可笑的世界里，每个精粒历史只包含获胜马的序列和有关马蝇的一些特别故事。如果粗粒历史只关心马和它们的胜利，而忽略马蝇，那么每个这样的历史将包含这样一组精细历史，其中每一历史里获胜马匹有一特别序列、马蝇中有某种故事。一般说来，每一粗粒历史是若干精粒历史的等价类，这些精粒历史的特征是对跟踪的现象有特定的描述以及被忽略的各种现象有任意可能选择的描述。

粗粒可以洗掉干涉项

对于宇宙的量子力学历史，我们如何对精粒历史分组，从而与具有真正概率的粗粒历史等类？怎么样让适当的粗粒历史之间没有干涉项？答案是两个粗粒历史之间的干涉项，是所有成对精粒历史（它们属于两个粗粒历史中的一个）干涉项的总和。所有这些项（它们可能是正也可能是负）的总和，可以消去大量的

项，然后给出一个很小的结果，或正或负或为零。我们记得，一个历史的 D 和历史自身，像一真实的概率一样，总是在 0 和 1 之间；当这样的一些量相加，它们是不会相消的。

宇宙中任何事情的任何行为，如果在粗粒历史中被略去，我们就可以说在这种求和过程中被“加遍了” (summed over)，所有被粗粒历史丢下的细节，所有没有被追踪的时间、地点和客体，都被加遍了。例如，各等价类可以将所有精细历史（其中有些粒子在每一时刻有确定位置，而所有的另一些粒子在简化的宇宙中完全没有确定位置）集合到一起。然后，我们可以说，第一组粒子的位置在每一时刻都被追踪，而第二组粒子的位置被忽略了，或者说加遍了。

还有一种粗粒历史，可以认为只是在某些时间里追踪了第一组粒子的位置，这样，在所有其他时间发生的事情就被加遍了。

粗粒历史的脱散—— 真正的概率

如果每对粗粒历史之间的相干项为零，无论是精确还是极好的近似，那么所有的粗粒历史就被称为脱散 (decoherence) 了。这样，每个粗粒历史的 D 值和历史本身就成为一个真正的概率，同时具有相加的特性。实际上，量子力学经常应用到脱散的粗粒历史组中，正因为如此它才可以预言一些概率。附带说一句， D 被称为脱散函数 (decoherence functional)；“函数”一词是指它依赖于历史。

拿赛马场下午的情况来说，粗粒化的意思是可以如下办法总加起来：宇宙每个东西的命运都加遍了，只除开一个特定跑道上竞赛的获胜者；所有时间发生的事件也加遍了，除开 8 个竞赛在特定的那天获胜的那一瞬间。最后的精粒历史脱散了，也有了真正的概率。由于我们的日常经验，使我们对这种事情如此发生并不感到惊奇，但我们却急于想知道它是怎样发生的。

缠结和脱散的机制

脱散的机制使得干涉项加起来以后成为零，并允许指定概率，那么这种脱散的深层解释是什么呢？跟随着粗粒历史中被忽略或加遍以后，出现了缠结（entanglement）。竞赛中马和骑手都要与空气中的分子、跑道上的沙粒和马粪、太阳的光子和马蝇相接触，所有这些在竞赛的粗粒历史中都要加遍。竞赛的各种可能结果，与在粗粒历史中所有被忽略者的不同命运有关。但这些命运被加遍了，而量子力学告诉我们，在加法中只要有适当条件，涉及不同命运被忽略的历史间的干涉项可以消失。由于缠结，不同竞赛结果间的干涉项，也可以给出零结果。

如果不考虑那些脱散的粗粒历史，而考虑一种精粒历史的极端情形，即有非零的干涉而没有真正的概率，我们就会变得犹豫起来。这种历史可能发生，但得跟踪整个竞赛过程，跟踪马身体内的每一个基本粒子和与每个马接触过的所有东西。但我们不必走极端，去寻找完全不缠结（即彼此相干）的历史。举一个著名的实验为例：从一个很弱的光源发出一个光子，它可以自由通过屏上两个缝中的任意一个，然后到达探测器上给定的一点——这两个历史相干，也不能给出概率。因此，说光子通过哪一个缝是毫无意义的。

概率和赌注差额的报价

为了明确起见，有必要再一次强调，对充分的粗粒历史，由量子力学和一个正确的物理理论给出的概率是最好的概率，它可以计算。对一序列赛马，这种概率就相应于我们曾说过的真正的赌注差额（true odds）。但是，在一次赛马中实际报出的赌注差额在性质上完全不同。它们只反映了参加赌注的人对即将进行的竞赛的某些估计。而且，相应的概率加起来绝不可能为 1，这是

因为竞赛需要获取利润。

轨道上一个物体的脱散

为了说明脱散的普遍性，我们可以举另一个例子：太阳系里一个物体轨道的近似描述。这个物体的大小可以从一个大分子到一个行星——一颗尘埃，一颗彗星，或者是一个小行星。我们考虑粗粒历史，即宇宙中所有其他物体的命运都加遍了，而且这个物体所有内部特性也都加遍了，剩下的只是在所有时间里质心的位置。除此而外，还假定位置自身只近似处理，这样，我们就只考虑很小的空间区域，而在每个小区域内位置的概率都加遍了。最后，假定粗粒历史把大部分经历的时间都加遍了，只跟踪在一小段时间间隔的时间序列中物体的近似位置。

假定轨道上物体的质量是 M ，小空间区域的线性尺寸是 X ，时间间隔是 T 。在 M 、 X 和 T 值很宽的域值里，物体在太阳系的不同的可能粗粒历史将会在很高的精度上脱散。决定脱散的主要机制仍然是该物体与其他物体常见的相互作用，这些其他物体的命运也被加遍了。在一个著名的例子里，这些物体是构成背景电磁辐射的光子，这种电磁辐射是宇宙膨胀开始（大爆炸）时遗留下来的。我们观察的轨道上的物体会不断地遇到这些光子，并让它们散射开去。每次物体和光子相遇，由于它们之间的碰撞，它们的运动会发生变化。但是，所有光子不同的运动方向和能量都被加遍了，于是这些方向之间、能量之间的干涉项就被洗掉了（wash out）。同样，轨道上物体不同粗粒历史中的干涉项也洗掉了。

历史（如太阳系里物体质心在某一特定时刻逐次的近似位置）之所以脱散，是因为物体与那些加遍了的物体（如背景辐射中的光子）不断相互作用。

这个过程回答了 50 年代早期费米（Enrico Fermi）常常向我提出的一个问题，那时我们在芝加哥大学共事。费米的问题是：

既然量子力学是正确的，为什么火星不从它的轨道上向外散开？习惯的答案是：火星每次都在一个确定的位置，那是因人正在看它。这个答案我们两人都熟知，但我们都认为这个答案太愚蠢。具体的解释是费米死后才得到的。这是由于有了蔡赫、朱里克和朱斯等理论物理学家，他们研究了脱散的机制，如我们刚才涉及背景辐射中的光子那样的情形。

从太阳发出的光子被火星散射开以后，也都加遍了，从而促使行星不同位置脱散，正是这些光子允许人们看到了火星。所以，当我们观测火星时看见它像一条红色鲑鱼，但使这观测成为可能的物理过程却根本与红色鲑鱼无关，我们可以认为行星绕太阳运动的不同粗粒历史之所以脱散，其部分原因是由于这种物理过程。

脱散的历史形成一棵分枝树

这种脱散的机制，使准经典领域（包括日常经验）得以存在。这个领域由一些脱散的粗粒历史组成，这些历史又可想像为一种树状结构。玻格斯（Jorge L. Borges）在他的一个聪明的小故事中说，这样一种结构犹如一个“不断有岔路的公园”。在每一分岔处，都有相互排斥的可供选择的历史。两个这样可供选择的历史经常用一条路的岔口表示，如弗罗斯特（Robert Frost）的诗“不走的那条路”中那样。

这种结构恰好在宇宙膨胀开始之时（或之后）作第一次分岔，进入可替换的可能性中。每一个分枝很快又分裂成岔，步入进一步可替换的可能性中，而且一直这样下去。每一次分枝，对可供选择的历史都有定义好了的概率。在它们之间没有量子干涉。

这种情形在赛马的例子中已经很好地叙述过。每次比赛涉及10个分枝，有10个获胜者可供选择，而每一个获胜者又会在下次比赛中，进一步分枝为10个不同获胜者可供选择。

在赛道上，一次比赛对另一次比赛的概率通常没有很大的影响。例如，一个骑手由于前一次失利会变得十分沮丧而影响下次比赛，这实际上并不常见。但是不论怎么说，在宇宙可供选择历史的分枝树上，一次分枝的结果可能深刻影响后继分枝的概率，甚至可以影响到后继分枝中可供选择历史的性质。例如，物质冷凝为火星可能取决于几十亿年以前的一个量子偶然事件；在那些不会让火星出现的分枝中，进一步的分枝就会明显地与那些使火星不会出现的可供选择的命运有关。

宇宙可供选择的脱散的粗粒历史的树状结构，不同于人类语言或生物物种之类的进化树。在进化树的情形下，所有的分枝都出现在同样的历史纪录中。例如，拉丁语系的语言都是由一种近期拉丁语分出来的，但拉丁语系的语言并不是一种可供选择的语言。法语、西班牙语、葡萄牙语、意大利语、卡特兰语和其他一些拉丁语系的语言，都是今天还一直在说的语言，即使那些现在已经灭绝了的语言，如达尔马希亚*语，也是一度实际使用过的语言。相反，可供选择的脱散的历史树，其分枝是相互排斥的，而且只有一枝可以被观察者看到。即使是提出多世界理论的艾弗雷特，他认为他的多世界都同样真实，但他也没有断言在这些分岔的世界中可以观察到多于一个以上的世界。

惯性大和近经典行为

仅仅脱散性（起因于历史分枝为不同的而又具有概率明确定义的可供选择的历史）自身，还不是准经典领域（包括日常经验）唯一重要的特性。这个领域还显示出大量经典的行为（因此也是“准经典的”行为）。火星在一序列挨得很近的时间里连续的位置，不仅仅具有真正的概率，而且这段时间里的位置，还彼此高度相关（概率非常相近）。在很高的近似情形下，它们相当

* Dalmatia 是南斯拉夫西南部一个地区——译者注

于一个意义明确的绕太阳转动的经典轨道。这个轨道遵循太阳和行星引力场中的牛顿经典方程，只需对爱因斯坦改进了的（广义相对论的）经典理论和行星与轻物体（例如背景光子）相撞引起的很小的摩擦力作小小的修正就行了。我们曾说过，这些小物体被忽略了，因此在跟踪火星运动的粗粒历史中这些小物体被加遍了，这也正是粗粒历史脱散的原因。

当行星不断受到光子任意轰击时，为什么它还能沿着决定论的经典轨道运动？回答是：轨道上的物体越重，它的不稳定性就越小，它在轨道上的运动就越平稳。这是因为行星的质量 M ，即它的惯性，抵挡住了打击，允许行星在很好的近似上按经典规律运动。一个原子，或者一个小分子，它们都太小，因此不可能在轨道上稳定地运动，太阳系里的任何物体与它相撞就会将它的平稳性破坏。一粒足够重的尘粒可以在轨道上较平稳地运动，一艘小的宇宙飞船就更平稳了。但即使是一艘宇宙飞船在太阳风（由太阳发射的电子组成）的轰击下也会有些振动。飞船和这些电子间的碰撞，对证实爱因斯坦引力理论的非常精密的实验，足以产生干扰；正是这种原因，要做这样的实验最好把雷达发射器放到火星上，而非放到空间探测器上。

虽然我们把准经典行为归因于物体的重量，但更精确地说应归因于惯性足够大的物体的运动。一罐非常冷的液体氮，它足够大也足够重，但是因为它内部某些运动的惯性很小，它会呈现出一种奇异的量子效应，开口罐内的液体竟可以爬出容器。

涨 落

物理学家有时想区分量子涨落（fluctuations）和经典涨落。经典涨落的例子有热涨落，它与炽热气体中分子的运动有关。在量子力学中要达到脱散的粗粒化，这意味着许多变量必须加遍，这些变量很可能包括那些描述分子运动的一些变量。经典的热涨落试图将自己与量子涨落混为一团。一个沿经典轨道运动得很好

的重物体，可以立即承受住两种涨落的效应；同样，一个较轻的物体则可能明显受到两种效应的影响。

由轻物体反复碰撞引起的不规则的运动，在 19 世纪早期受到植物学家布朗（Robert Brown）的注意，以后他研究的这种不规则运动就称为布朗运动。这种运动很容易观察到，我们将一滴墨水滴进水里，然后在显微镜里观察墨水粒。它们那种极不平稳的运动，被爱因斯坦用墨粒与水分子碰撞引起的涨落，作了定量的解释。这样，分子第一次被人们有效地观察到了。

薛定谔猫

在准经典领域里，物体近似遵循经典定律。它们会发生涨落，但这些涨落是一些叠加在相当经典行为模式上的单个事件。一旦这一情形出现了，那么，另一个经典物体在历史上的涨落，就可以放大到任意的等级。一架显微镜可以放大一个墨粒被一个分子撞碰的图像，一张照片可以无限期保存这放大的图像。

这使我们想起了关于薛定谔猫（Schrödinger's cat）的著名实验。在这个实验里一个量子事件被放大，使它可以控制一个猫是否会被毒死。这样的放大即使不太精巧，但是完全可行。将一个装置挂在猫头上，这只猫的生命将决定于，例如，一块核碎片在衰变时辐射的方向。（在今天，一个人利用热核武器可以用相同的方法确定一个城市的命运。）

通常对薛定谔猫作如下讨论：描述在死猫和活猫两种剧情中无法断定的量子干涉。但是，活猫与外界有明显的相互作用，例如呼吸；而且即使是死猫，它也在某种意义上与空气相互作用。把猫放在箱子里也没有用，因为箱子要与外界发生相互作用，因此，猫还是与外界发生了相互作用。因此有大量机会，使猫活着的粗粒历史与猫死了的粗粒历史之间脱散。活猫和死猫剧情脱散；两种剧情之间不会相干。

也许正是猫故事的相干状况，使霍金声称：“当我听到关于薛

定愕猫的故事时，我就摸我的枪。”其实他是模仿约斯特(Hanns Johst)的一句话：“当我听到‘德国文化’这个词的时候，我就失去安全感而抓起我的勃朗宁手枪。”

假定决定猫命运的量子事件发生了，但我们在没有打开装猫的箱子以前，并不知道什么事情发生了。既然两个结果是脱散的，那么这种情况和一种经典的情况没有什么两样，即一个装有野兽的箱子在长距离空运到达目的地后，我们在打开箱子时，那可悲的野兽可能死了，也可能还活着，两者有相同的概率。但是人们浪费了大量的纸张去讨论那猫的假定的离奇古怪的量子力学状态：猫在同时既死了又活着。没有任何真实的准经典物体能够呈现出这种行为，因为猫与外界宇宙的相互作用，会使可选择的结果脱散。

对惯性和准经典性的附加的粗粒化

准经典领域很自然地要求历史足够的粗粒化，以使这些历史能够在高度近似情况下脱散；但它还要求能进一步粗粒化，使历史上跟踪的对象在相当程度上有足够的惯性能够抵挡涨落，这些涨落显然与加遍了的事件有关。然而，相对经典行为来说这儿还是有一个小的偏离，有时候这偏离还会很大。

对惯性大的物体需要附加的粗粒化，其原因是足够大块的物质可以被跟踪，而且这些大块物质可有很大的质量。（如果某些稳定或近乎稳定的具有大质量的基本粒子可以得到，它们将提供一种不同的大惯性源。这些粒子在实验中尚未见到，但它们很可能存在；如果真的存在，它们将在宇宙膨胀最早期的时刻起重要的作用。）

测量情境和测量

一个量子事件可能变得与准经典领域的某事件充分相关。这

种情形在猫故事敏感的部分出现过，在那儿量子事件与动物的命运相关。这儿有一个比较简单而又不那么惊奇的例子：一块不纯的云母晶体中出现一个放射性核，这个核在衰变时只放射出两个向相反方向运动的带电碎片。其中一个碎片的运动方向在衰变发生前完全不能确定；但在衰变后它与留在云母中的一个痕迹完全相关。准经典的历史，像软辐射留下来的痕迹一样将所有要考察的加遍了，让彼此散开的不同方向彼此脱散。对于那些留下的痕迹，在通常温度下可以保留几十万年或更长的时间；当然仅仅只有持续的存在是一个（即使是不重要的一个）经典历史的例子。放射性衰变已触及到准经典的领域。

由于自发核分裂时留下的蜕变产物，在矿物中累聚起来形成的痕迹，常常用来测定矿石形成的年代；这种方法称为分裂跟踪测定法（fission-track dating），它可以用来测定几十万年以前生成的岩石。假定一个物理学家要对一个特定的痕迹进行研究。当他或她要测定岩石的生成年代时，他或她可以被认为在测量放射性核衰变的方向。无论怎么说，那痕迹在出现之日就一直留在那儿，并不是物理学家注意到它时它才存在（如像某些笨拙的量子力学描述可能猜测的那样）。当核衰变和痕迹形成之时，一种测量的情境就存在了；这就是一种与准经典领域的强相关已经建立起来了。实现具体的测量可以用一只蟑螂或者其他复杂的适应系统。这种测量包含着“注意”（noticing）一个特定可供选择的对象，它产生于一组具有不同概率的脱散的可供选择对象。这正像赛马场上发生的事情一模一样：我们“观察到”一匹特定的马在一次比赛中获胜。获胜的记录已经出现在准经典领域中，又被进一步记录在观察者的脑子里。但是，有许多敏感而聪明的解说员记下了有关测量过程中所谓人类意识的重要性。注意和观察真的那么重要吗？它们到底意味什么？

IGUS——作为观察者的一个复杂适应系统

在这里一种观察是指修剪分枝的历史之树。在一种特殊的分枝情形下，只有一个树枝被保留下来（更精确地说，在每个树枝上，只有那条树枝被保存下来！）那些剪下来的树枝被扔掉了，与此同时，长出树枝的整个树被修剪了。

在某种意义上说，带有核分裂痕迹的云母完成了一种修剪工作。因为这痕迹记录下分裂碎片具体的运动方向，这也等于记下了所有其他碎片的运动方向。但一个观察这种痕迹的复杂适应系统，一般用更清楚的方法来修剪，其中包括观察信息流（这些信息流给出演变的概貌）。系统以后的行为，就可以反映出系统对特殊痕迹方向的观察。

一个作为观察者的复杂适应系统可以有一个特殊的名称。哈特和我称它为 IGUS (information gathering and utilizing system, 信息收集和利用系统)。如果 IGUS 具有某种有效等级的知觉或自我意识（也就是说可以注意到观察一个核分裂痕迹方向这一活动的自身），那就更好了。这有什么必要吗？难道任何一个人，那怕是非常弱智的人，他做的观察真的就比一个大猩猩或者一个非洲人猿做的观察有更大的意义吗？如果不是这样的，为什么不用一只南美栗鼠或者一只蟑螂来代替狼猴？

当涉及到修剪历史的分枝树时，恐怕还是应该在人作为观察者（他知道有关量子力学的知识，因此知道树的起源）和其他不知道这些知识的观察者之间，作一种区别。在一定的意义上，这两者之间的不同，要大于一个不懂量子力学的人和一只南美栗鼠之间的不同。

当一个特定的结果已经知道后，一个 IGUS 除了能删去可供选择的分枝以外，它还可以利用量子力学提供的概率近似描述，对未来的结果作出大胆的判断。仅仅是一个复杂适应系统，无法作出这种判断。不像一片云母，一个 IGUS 可以把未来事件的估

计概率输入到一个图式中，并以此图式确定其未来的行为。例如，一只住在沙漠里的哺乳动物，在下雨后的几天里它可能走很远一段路到一个深的水洞去，但它不会到一个浅水洼去，因为深水洞仍然有水的概率要大一些。

修剪树枝可以代替通常所说的“波函数的塌陷”(collapse of the wave function)，后者是量子力学的一种传统解释。这两种描述在数学上并非不相关，但“塌陷”似乎常常被说成是量子力学里的一个特殊神秘的现象。但修剪说则只是承认在一组脱散的可选择对象中，一个或另一个发生了。这很常见，不令人惊奇。我可以举例说明。我留在家里，根本没去巴黎，那么，所有与我打算去巴黎的历史分枝，都被排除，它们的概率现在都是零，而不管它们以前是怎么样。

在讨论所谓塌陷问题时弄不清楚的地方，即使修剪了有关量子事件的测量，也仍然弄不清楚，它仍然是在脱散的可供选择事件间一个通常的判断。量子事件只能在准经典领域里被检测到。这种情形正是经典概率的一种，就好像掷骰子或扔钱币一样，当结果出来以后，概率就改变为1和0。准经典领域承认相当稳定记录结果的可能性；在一种准经典链（每个记录和前面的一个记录近乎确定地一致的链）里，记录可以放大或再三复制。一个量子事件一旦与经典领域相关（创造一种测量情境），在一给定历史分枝中，一个特定的结果就变成了事实。

自我意识和自由意志

既然意识的问题曾经被提出来了，那就让我们离开一下主题，专门谈一下意识问题。比起人类的近亲大猿猴，人脑的前部要向前凸出很多。神经生物学家们曾经发现，前额突出的部分似乎与自我意识、目的和动机有关，而人类的前额有特别充分的发展。

把人类思想许多有类似过程的部分连结到一起，意识或注意

似乎涉及到一个序列的过程，一种聚光灯似的东西可以把一种想法或敏感输入，迅速而又连贯地转变为另一种。当我们相信我们立刻注意到许多不同的事情时，我们可能真的用了一个聚光灯先后照亮我们周围被注意的不同物体。那些有类似过程的各部分，它们对意识的可接近性彼此不同，因此人类某些行为的根源，埋在思想的夹层里，很难成为自觉的意识。

尽管如此，我们还是说：意见和行动在相当程度上是在意识的控制之下，我们的陈述反映的不仅仅是承认意识的聚光灯，而且也反映出强烈地信任我们有一定的自由意志。选择的可能性是一个重要的性质，例如“不走那条路”（The Road Not Taken）的可能性。

什么样的客观现象可以引起主观上自由意志的效果呢？我们说自由地作出一个决定，意味着这个决定并不是严格根据以前发生过的事作出的。这种明显的不确定性的根源是什么？

有一种解释试图认为，根源在于基本的不确定性。大概是这些量子力学的不确定性被经典现象（如混沌）放大了。一个人的决定，因此有着不可预言的特性，这种特性我们在日后可以贴上自由选择标签。但有人会奇怪，人类大脑皮层的什么特性对量子涨落和混沌有影响呢？

我们不仅仅求助于那些简单明白的物理效应，也可以考虑那些更直接与脑和心有关的过程。我们还记得，对一个给定的粗粒化历史，所有加遍了的（不追踪的）现象可以影响表观上的不确定性（如热涨落），这些不确定性与量子涨落归并到了一起。既然经常有许多组思想没有被意识的探照灯照亮，那么这些组思想，在被自觉记住了的极端粗粒化历史中被加遍了。这最后的不确定性，比起仅仅与物理学联系在一起的不确定性，就更像影响自由意志的主观印象。换句话说，人类的行动更多地是起因于一种隐藏的动机，而并非一种内部随机或伪随机数字发送器的结果。但是，对整个事情我们还是了解得很少，我们暂时还只能推测。这种推测早已不是什么新鲜事，而且总是十分含糊。尽管如

此，我认为没有理由说，我们不能用科学研究的方法讨论各种不确定性的可能作用。这种不确定性在大脑皮层和相应智力活动中将会出现。

用什么表征熟悉的准经典领域的特征

准经典领域（包括熟悉的日常经验）的粗粒化历史中，有些类别的变量在其他变量被加遍了（即被忽略了）的时候，仍然被跟踪。这是一些什么类别的变量呢？大致上说，通常的准经典领域要跟踪引力和电磁场，还要精确地让一些诸如能量、动量、电量之类的量守恒，同时还要让一些量近似地守恒，如一个晶体中由于带电粒子的经过而产生的晶格位移数就近似守恒。当某个量的总量在一个封闭系统中不随时间而改变，那么这个量就是守恒的；如果这些总量仅仅在一个短的时间间隔里发生改变，那这些量就是近似地守恒。一个守恒的量（如能量）不能创造也不能消灭，它只能转换。但晶体内晶格的位移，当一带电粒子经过时，却明显地可以创造；但这些位移可以在数万年内保持不变，在这种意义上这位移就是近似守恒。

熟悉的准经典领域包含有在一个小的空间范围里，加遍除掉这些场和保守或近似保守量的值域以外的所有事物；但当空间范围大到其惯性足以承受涨落，而这些涨落与所有的变量的效应有关，这种情形就不再有上述例外，而通通被加遍。这就是说，如果涨落被有效地承受下来，那么所跟踪的量就呈现出准经典的行为。

必须在相隔不太近的时间间隔里跟踪这些量，这样可供选择的粗粒化历史就能够脱散。一般说，粗粒化变得太精细（因为时间间隔太短，空间范围太小，或者被跟踪的量值域太窄），历史之间相干的危险就会出现。

让我们考虑一组可供选择的粗粒化历史。我们作了最严格的挑选，这就使得任何进一步的精细化的行为，会毁灭脱散或历史

的近经典特性，或把两者同时毁灭。小的空间范围里，守恒和近似守恒的量在适当的时间间隔里被跟踪，因而这个小空间可以包罗整个宇宙，但是如果对时空（和这些量的值域）进行某种粗粒化，那么这个空间就只适于产生脱散和近经典可选择的历史。

人类和我们所接触的系统的经验，是一个比最准经典领域更加粗粒化的领域。从最准经典领域到可以接近的实际观察，还得有大量的附加条件。这种可接近的领域注意的只是很受限制的时空区域，而且在这区域里变量的作用范围也时常变化。（恒星或其他行星的内部几乎完全不可接近，而且它们表面上发生的事，也只能在非常粗粒化的情形下才能探测。）

相反，最准经典领域的粗粒化历史，对人类无法观察的变量用不着加遍，因此而被忽略。这些历史可以包括那些对发生在任意遥远时空过程的描述，这种描述提供了可供选择的结果。它们甚至可以涉及宇宙膨胀刚开始发生的事件，那时大概任何地方都没有作为观察者的复杂适应系统。

总之，一个最准经典的领域是一组周密的、相互排斥的宇宙粗粒化历史，这个宇宙覆盖整个时空；这些历史彼此脱散，大部分时间近乎经典领域，并且最精确地与其他条件相符。在我们讨论的这种特殊的最准经典领域里，那些跟踪的量在一个小的空间里是保守的和近保守的。我们利用大量附加条件和相应的感官和仪器的能力，才从这样一个最准经典域里得到人类经验熟悉的领域。

分枝和被跟踪量的依存关系

再次强调下面的结论是十分重要的：在一给定时间里，跟踪某特定的量可能依赖于一个早先的历史分枝的结果。例如，地球上质量的分布（有时用行星内大量小空间内的每一个空间所包容的能量来描述），就很可能用粗粒化历史跟踪到地球存在的遥远时间。假如有一天地球被某种现在无法预测的灾难击成碎片，将

会出现什么情况？如果灾难将地球这颗行星化为蒸气，如某些 B 级电影上显示的那样，又怎么样呢？假定上述情形在历史上发生过，那么此后用粗粒化历史方法跟踪的一些量，就将不同于灾难前。换句话说，用给定的一种历史粗粒法跟踪的量，可能与分枝有关。

单独的客体

我们已经讨论了准经典领域，其中包括一些熟悉的日常经验，我们用场的值域和在空间范围里精确（或近似）守恒的量来描述这些经验。那么，我们又该如何描述单独的客体（如行星）呢？

在宇宙历史的早期，大量的物质在引力作用下凝聚到一起。当我们这样描述星体形成时，物质冷凝后各种不同粗粒化历史的故事，就简单多了。记录一个银河系的运动，比起分别列出当银河运动时在很小很小的空间里物质密度所有的坐标变化，要简单得多。

当银河里产生恒星、行星、岩石和在某些地方出现复杂适应系统（如地球上的生物）时，单个物体的存在就越来越具有准经典领域惊人的特性。宇宙的很多规律性大都可以用这样的客体进行简要的描述。这样，单独事物的特性就可以代表许多实在的宇宙复杂性。

在大多数情况下，当定义允许比较少量的物质增减，单独物体的描述是最简单的。当一颗行星增加了一颗陨石，或者一只猫呼吸，这行星或猫的密度是不会变的。

但是，单个物体如何被测量？一种办法是用一组可比较的物体，并且在给定粗粒化限度内，尽可能简单地描述它们不同的特性（就像我见到八只加利福尼亚秃鹰饱餐一只小牛犊落下羽毛时的情形一样）。这样，描述一个典型个体的比特数和必须在某一集合中数出这些个体所得到的比特数，可以相互比较。假如涉及

到特殊的粗粒化方法，描述的数目大大地多于相互比较的物体数目，那么这组物体就呈现出各自的个性。

我们来考虑所有的人类，现在人类大约有 55 亿。给每个人分一个彼此相异的数，将是 32 个比特^{*}，因为 $2^{32} = 4294967296$ 。但是，即使对每个人粗疏地看一看，并作一简单采访，我们就可以容易看出，其信息将大大地大于 32 比特。我们再稍稍深入研究一下，这些人将显出更多的个体性。我们可以想像，当他们每个人的基因组都能被读出，那该有多少附加信息便会十分清楚了。

我们银河系的恒星，还不算那些将来有一天会发现的暗物质，大约有 1000 亿个，给每颗星一个序列数就得大约 37 个比特。对近处的太阳，我们所需的信息比天文学家们所得到的还要多很多，但对其他恒星则更粗粒化一些。恒星在天空中的位置，亮度、发射光谱和运动，都可以在某种程度上测量到，其精确性与距离有关。整个信息的比特数一般会比 37 比特大很多，在某些情形下也许还会小些。按今天天文学家的意见，恒星与太阳不同，它们呈现出某些个性，但不是太多。

今日观察的特殊粗粒化特性，可以用转变为一个最准经典领域的办法来避免。这些最准经典领域由可供选择的历史组成，覆盖整个时空，这些历史不仅脱散和近经典，而且在某种意义上在给出脱散性和经典性方面，最精粒化。哪儿有近似，哪儿的历史就可以用单个的物体来表示，这些单个的物体可以非常仔细地被跟踪，并显示出一种相应高度的个体性。

在一般最准经典领域，与任何恒星有关的信息要大大地大于我们对太阳已知的信息。同样，有关任何人的信息要比我们今日可得到的信息也丰富得多。事实上，没有任何复杂适应系统在观察一颗星或一个人时，能利用这样巨大的信息量。更有甚者，许许多多资料都将与星球内部或外部物质密度的随机或随涨落

* 比特，bit，二进位数，信息容量单位——译者注

有关。很难想像一个复杂适应系统在大部分信息面前利用到些什么。但是，资料中的规律性东西十分有用；事实上，内科医生在使用MRI（magnetic resonance imaging，磁共振成像）或CAT扫描（X-ray computer- assisted tomography，计算机辅助层析X射线摄影）作诊断时，利用的正是这种规律性的东西。如通常情形一样，一个由善于观察的复杂适应系统所形成的描述性纲要，是一张陈列规律性的简明的表，这个表的长度就是被观察物体有效复杂性的一种测量。

量子力学变化多端的性质

像经典概率的情形一样，例如一组赛马，宇宙粗粒化可供选择的历史（它们构成最准经典领域），形成一棵树状分枝结构，在每一个分枝上对不同的可能性有意义明确的概率。那么，量子力学与经典力学到底有什么不同呢？一个明显的不同是：在量子力学里粗粒化必须对理论得出某些有用的东西，而在经典力学里引入粗粒化，只是因为测量的不精确性或者是某种其他实用的限制。还有另一个更加重要的不同之处，即量子力学的变化多端性可以解释量子力学的违背直觉的性质。我们知道传统神话中的海神普洛透斯（Proteus），他是一个难得的预言家，他可以任意改变自己的形状。为了抓住他并让他作出预言，必须在他不断改变形状时抓住他。

我们回到简化了的宇宙精粒历史，在这种情形下，宇宙中每个粒子在任何时刻的位置都精确确定了。在量子力学里，位置是一种任意的选择。当海森堡提出不确定性原理后，要同时以任意精确性同时确定一给定粒子的位置和动量是不可能的，但这并不妨碍在这些瞬间中的某些瞬间，精确测定该粒子的动量（而不是位置）。因而，选择精粒历史可以用很多不同的方法，我们可以在某些时间里用动量来描述粒子，而在另一些时间里用位置描述。甚而言之，可以用无数其他更巧妙的方法来建构宇宙的精粒历史。

有许多不等价的经典领域吗？

对这些组精粒历史的每一个，不能考虑很多不同的粗粒化方法，也不能问哪一种方法可以（如果允许的话）导致一种最准经典领域，后者的特点是脱散的粗粒历史，显示出近经典的行为（只有持续小的偏离，偶而出现大的偏离）。更有甚者，人们可以问在这些领域里真有什么明显的区别吗？它们是不是多少有些相同？

哈特尔和我和其他一些人，试图回答这个问题。除非得到反证，人们仍然可以相信，的确有很多组不等价的最准经典领域，其中我们熟悉的只是一个单个的例子。如果这是真的，那么我们熟悉的准经典领域与其他准经典领域有什么区别呢？

那些信奉量子力学早期观点的人可能说，人类已经选择测定某些量，而这些选择帮助人们决定了我们与之打交道的准经典领域。或者更通常一点地说，他们可能说人类只可能测量某些种类的量，于是准经典领域就必须（至少部分是）奠定在这些量的基础之上。

复杂适应系统的庇护所

准经典性向所有的人和所有与我们有联系的系统，保证可以比较不同资料的可能性。这是真的，这样，我们正在与之打交道的是相同的领域。但是，我们真是共同在挑选那个领域？这种以人为宇宙中心的观点，像量子力学在其他方面这时的解释一样，也许是不必要的。

另一种不太主观的方法是从一个最准经典领域开始，并且注意在某一些时期某一确定空间区域里，沿着某些确定的分枝，最后显示出来的恰好是规律性和随机性的一种混合的结果，这结果有利于复杂适应系统的进化。近经典行为提供规律性，而涨落偏

离决定论，则提供可能性的要素。放大的机制（包括混沌情形）允许这其中的某些偶然的涨落与准经典领域发生关联，并引起分枝。因此，当复杂适应系统发展时，它们的确会与一个特定的最准经典领域发生联系，我们不要认为这些系统是按能力来挑选这些领域的。相反，系统的定位和能力决定了附加粗粒化的程度（在我们讨论的情况中，的确是非常之粗），这种粗粒化应用于特殊的最准经典领域，以便被系统理解。

假定宇宙的量子力学允许用数学来处理各种可能的最准经典领域（它们之间真正地不等价）；还假定复杂适应系统实际上发展到利用每个最准经典领域的某些粗粒化方法，那么，每个领域会提供一组可供选择的宇宙粗粒化历史，而 IGUS 将在每种情形下，记录可能历史之树上各种概率分枝的结果。这儿的每棵树在两种情形下将完全不同！

如果在两个不同的准经典领域跟踪的现象有某种程度上的一致，那么两个 IGUS 彼此会感觉得到，甚至在某种程度上相互通信。但是被一个 IGUS 跟踪的大量现象，不能直接被另一个觉察到。只有通过一种量子力学的计算或测量，一个 IGUS 可能对另一个 IGUS 感觉到的所有现象作出评估（这可能使某些人记起男人和女人之间的关系）。

一位利用一个领域的观察者真能意识到其他领域（有它们自己的历史分枝和观察者），也像宇宙可能历史中可供选择的描述一样有用？这个令人神魂颠倒的争论曾经被科幻作者提出过，他们有时根据俄罗斯理论物理学家斯达洛宾斯基（Starobinsky）的提法，用到“小妖精世界”（goblin worlds）这种表述。

我们正在努力建构量子力学的现代诠释的目的，是想终止尼尔斯·玻尔所说的时代。玻尔曾经说：“如果一个人说他可以思考量子物理学而不会感到迷惑，这只不过说明他一点也不懂量子物理学。”

第十二章 量子力学和傻话

当量子力学中还有许多问题没有得到全部解决以前，本不必要介绍使人迷惑但又事实上不存在的一些问题，但是，近来有不少人又恰好写到量子力学中的这些问题。

由于量子力学预言的只是概率，因此在某些圈子里它获得了一个名声：它只可能知道任何事情的大概情形。这是真的吗？这决定于非常非常低概率的事件是否包括在内。我记得，当我是一个研究生时，我被指定计算一个问题，它涉及某个宏观的重物体在某一时间间隔里，由于量子涨落而跳到空中的概率。我的答案是概率为 10^{-62} 。这个问题告诉我们，这种概率和零并没有什么实际区别。任何不可见的事物，实际上是不可能的。

当我们注意到那些具有有意义的概率，因而实际上真正可能发生的现象时，我们发现很多在经典物理学中不可能发生的现象，在量子力学中实际上也不可能发生。但是，公众对于这一点的理解，受到近几年一些轻率的书籍和文章的误导，其中包括已故的贝尔（John Bell）的一些精致的理论研究和一些相关的实

验。

某些涉及两个反方向运动光子的实验报导，给予读者一种错误的印象，似乎测量其中一个光子的性质时会立即影响到另一个光子。于是得出了这样的结论：量子力学允许超光速的传播信息；甚至还断言“超自然”（paranormal phenomena）现象（如预言）因此可以接受！这种事情是怎么发生的呢？

爱因斯坦反对量子力学

在某种程度上，这个故事要从爱因斯坦对量子力学的态度开始。在 20 世纪早期，爱因斯坦在关于光子的辉煌的研究中，认真地利用普朗克（Max Planck）提出的量子假说，从而为量子力学的发展铺平了道路。但尽管如此，爱因斯坦却不喜欢量子力学。1930 年，在布鲁塞尔的索尔维会议上，爱因斯坦提出一个论证，声称量子力学前后矛盾。玻尔和他的同事们在接下来的几天里疯狂般地研究爱因斯坦的论证，想找出这位伟人论据中的漏洞。在会议结束之前，他们终于可以向爱因斯坦证明：爱因斯坦忽略了一些事情；令人惊奇的是，他忘掉了的正是广义相对论的效应！考虑了这个效应之后，所谓的前后矛盾就消失了。

在这之后，爱因斯坦放弃了试图证明量子力学内部的不一致性，而集中精力对他相信（而量子力学违背）的原理，给出一个应该遵守的正确的理论框架。1935 年，他与另两位年轻的助手玻多尔斯基和罗森（Podolsky and Rosen）合作，发表了一篇论文，在论文中他们描述了这个原理和一个假想实验，在这个实验里量子力学不能和这原理一致。这个原理，爱因斯坦称之为“完备性”（completeness），向量子力学的最本质特性发起了挑战。

下面我们简略地谈谈爱因斯坦的要求。如果用某种测量方法，可以确定地预言某一特殊量 Q 的值，而且如果用另一种完全不同的测量方法，可以确定地预言另一个量 R 的值，那么，按照完备性的概念，人们可以同时赋予两个量 Q 和 R 精确的值。

爱因斯坦和他的助手成功地找到一些量，这些量（如同一物体的位置和动量）在量子力学里不可能在同时赋予精确的值。于是，在量子力学和完备性之间出现了一个直接的矛盾。

一次测量在一给定时间里可以赋予粒子精确位置，另一次测量在相同的时间里可以精确地给出动量，在量子力学里，这两个测量之间的实际关系是怎么样的呢？这两个测量发生在两个不同的分枝，而且彼此脱散（就像一个历史分枝中一匹马在一次比赛中获胜，另一个分枝则是另一匹马获胜）。爱因斯坦的条件相当于说，两个可供选择的分枝的结果必须共同接受。这显然是要我们放弃量子力学。

隐 变 量

事实上，爱因斯坦并不想用另一种不同的理论框架替代量子力学。在另外一些地方他指出，他相信量子力学的成就仅仅是近似正确的理论结果，并且是另外一种理论预言的统计平均。

爱因斯坦的想法在不同的理论家和在不同的时期里，呈现出一个更确定的形式，即量子力学可能被一个决定论的、经典的框架所替代，但在这个框架里有非常之多的“隐变量”（hidden variables）。这些变量可以想像成是一些看不见的苍蝇，在宇宙各处嗡嗡地飞来飞去，近乎随机地与基本粒子相互作用，并影响基本粒子的行为。只要这些苍蝇不能被探索到，理论物理学家们能做出的预言，最多也只是对苍蝇的运动作出平均的统计。但这些看不见的苍蝇可以引起无法预言的涨落，而这些涨落又造成了不确定性。希望在于这些不确定性能以某种方式与量子力学相适应，从而使这种图式的预言与量子力学的预言相一致，而我们知道，后者的预言得到了众多观测的证实。

玻姆和爱因斯坦

我知道有一位理论物理学家至少在一段时间内，在下述两种情况下犹豫不决：一方面相信量子力学，另一方面又想也许可以用一种像“隐变量”之类的东西替代量子力学。这位物理学家就是戴维·玻姆（David Bohm），他用毕生的精力试图了解量子力学的意义。

1951年，当我刚拿到博士学位并在普林斯顿高级研究所做博士后的时候，戴维是普林斯顿大学的助理教授。我们俩都是单身汉，常常在傍晚绕着普林斯顿散步，并讨论物理学的问题。戴维告诉我，他作为一个马克思主义者很难相信量子力学（马克思主义者倾向于认为他们的理论是完全决定论的）。既然量子力学取得了巨大的成功，而且又不与任何观测相矛盾，他曾经试图承认量子力学在哲学上终究是可以接受的。在试图让量子力学与他的马克思主义信仰相协调时，他曾就量子理论写过一本基础教科书，强调诠释问题。当这本书快出版时，戴维焦急地想把有关章节拿给爱因斯坦看，看他能否说服这个伟人的反对意见。戴维请我安排一次会见。我回答说，我不合适做这件事，因为我跟爱因斯坦很不熟悉，但我可以和杜卡斯（Dukas）小姐谈一下，她是爱因斯坦的秘书，虽然很难对付，但是看她能做点什么。

过了一两天后，当我遇见戴维时我告诉他，我正在为约会努力，但他激动地打断我的话，说约会完全不必要了。他的书已经出版了，而且爱因斯坦已经读过了，并打电话告诉戴维说在所有反对他的论著中，戴维的书是他见过的最好的礼物，并且说他们应该在一起共同讨论一下。当我再次见到戴维时，当然急于想知道他们的谈话情况，因此我问了他。他似乎很腼腆地对我说：“他和我作了详谈。我要回到写书以前的我。”从那以后大约40年，戴维试图对量子力学作再次详细阐述和诠释，以消除他的疑惑。最近，我非常伤心地得知他去世了。

EPRB 试验

多年以前，戴维·玻姆建议用一个改变了的和更实际的试验，代替爱因斯坦、玻多尔斯基和罗森的假想的“完备性”实验（这个实验这儿不再多说）。玻姆的实验（又称 EPRB 试验，以纪念这 4 位物理学家）涉及一个粒子衰变为两个光子。假设这个粒子静止，也没有内部的“自旋”（internal “spin”），然后，两个光子向相反方向运动，它们有相同的能量和同样的偏振。如果一个光子是左圆偏振的（向左旋转），另一个也必将如此；同样，如果一个光子是右圆偏振的（向右旋转），那另一个也将如此。更有甚者，如果一个光子沿一特定轴的平面偏振（即电场沿这个轴振荡），那另一个光子也必然如此。

假定光子在进入探测器以前不受任何干扰，进入探测器后如果测出一个光子的圆偏振，那么另一个光子的偏振就确定了——相同。类似地，如果测出一个光子的平面偏振，那么另一个光子的偏振也就确定下来——仍然相同。爱因斯坦的完备性应该意味着：能够对第二个光子的圆偏振和平面偏振这两者都给出确定的值。但是，一个光子的圆偏振和平面偏振不可能同时给出精确的值（正像一个粒子的位置和动量也不可能同时精确给出一样）。因此，按量子力学的观点，完备性的要求在这种情形也仍然不合理，如爱因斯坦和他的同事当年讨论的结果一样。这两个测量，一个是圆偏振，另一个是平面偏振，是两个可供选择的测量；它们出现在不同的历史分枝上，我们没有理由期望同时考虑两者的结果。

EPRB 和隐变量的可选择性

以后，约翰·贝尔（John Bell）的理论研究揭示出，用某些测量两个光子偏振的方法，EPRB 实验的装置可以用来区分子

力学和假定的隐变量理论。贝尔的定理（也称贝尔不等式）涉及到一个特殊的量，这个量可以给出两个光子偏振间的相关性。在量子力学里，这个量可以测出它的值，但经典隐变量理论却不容许。

贝尔的书出版以后，各个小组的实验物理学家都开始做EPRB实验。大家都急切地等待结果，不过实际上所有的物理学家都一直断定量子力学是正确的，因为它已被许多事实所证实。人们可以料到，当世界上所有对这个实验感兴趣的人听到实验结果后，会轻松地叹一口气，然后又像往日那样生活下去。但是出现了意料之外的情况，有一阵子各种实验报告纷至沓来，断定量子力学已被证明有一些离奇古怪和令人不安的特性。当然，量子力学还是原来的那个量子力学。除了进一步证实了量子力学和接着而来的心慌意乱的傻话以外，并没有出现什么新东西。

故事被歪曲了

在新闻媒介和各种各样的书中，主要的歪曲是这些传播暗示，有的甚至明确断言，在测量一个光子的偏振（圆和平面两者）时，不知由于什么原因，影响到了另一个光子。事实上，测量并没有引起任何从一个光子传到另一个光子的物理效应。那么，到底发生了什么？如果在一个特定的历史分枝上，一个光子的平面偏振被测量了，并因此给出了确定性，那么，在相同的历史分枝上，另一个光子的平面偏振也就被确定地给出。在一个不同的历史分枝上，一个光子的圆偏振可能被测量，在这种情形下，两个光子的圆偏振都被确定地给出。在每个分枝上，这种情形犹如贝尔在他论文中提到的伯特曼（Bertlmann）的短袜。伯特曼是一位数学家，他经常一只脚穿粉红色短袜，而另一只脚穿绿色短袜。如果你只看到他的一只脚，穿的是绿色短袜，那你立即知道他的另一只脚穿的是粉红色短袜。这时，并没有任何信号从一只脚传到另一只脚。同样，在证实量子力学的实验中，并没

有信号从一个光子传给另一光子。没有发生超距作用。

上述测定一个光子会立即影响另一个光子的虚假的报导，引出了所有各种各样令人遗憾的结论。首先，断定效应是瞬时的，这违背了相对论的要求：没有任何一种信号——即物理效应，能传播得比光速还快。如果真有这样一种信号，那么当观察者正要测量这运动中的信号时，信号却正好归来了！这正如一首打油诗中所描述的那样：

少妇名叫布赖特，
走得比光还要快。
今天出门去旅行，
相对论道上向前迈；
可是昨晚已回家，
瞧这事情怪不怪？

其次，某些作者声称在量子力学里可以接受“超自然”现象，例如预知，即某些“通灵”（psychic individuals）人可以预先知道一些偶然过程的结果。无需多说，这些现象会扰乱量子力学，正像它曾扰乱过经典物理学一样。如果说坦率一点，这些人实际上想如我们所知那样，将自然界的定律作一次彻底的修改。

第三种傻话的表现是屈服于某些建议，如美国国防部建议利用量子力学达到在军事上用超光速通讯的目的。人们会奇怪，这些远离常规的新事物，在比较过时的领域里（如反引力、永恒运动）是否意味着其数量应该逐渐减少。如果不是这样，那一定是处理这类事件的官僚机构在增加。

EPRB 重要的潜在应用

与此同时，严肃的研究者们开始思考，EPRB 效应也许可以实际地加以利用。他们没有陷于空想，而是提出一些令人神往的潜

在应用。例如,贝纳特(Charles Bennett)、布拉萨德(Gilles Brassard)和埃克特(Artur Ekert)曾经想发明一种量子密码,在这种密码里 EPRB 效应一再用来让一根随机弦产生一些二进制码,只让两个人知道,其他任何人都不可能知道,这种弦因此可用来作为传递信息的不可识破的密码,仅在两个人之间秘密使用。

这种方法的大致原理如下。假定只有阿丽丝和玻普两人可以得到 EPRB 光子对稳定的供应。每一对光子中,一个光子到阿丽丝那儿去,另一个到玻普那儿去。他们两人事先就同意对各自的光子,作了长系列的平面偏振测量,区别两个垂直方向的一半机会称为 x 和 y ,区别另两个相互垂直方向的另一半机会称为 X 和 Y (x 和 y 轴旋转 45° 就成了 X 和 Y 轴,如图 12—1 所示)。阿丽丝随机选择了她的光子,并不关心它将经受 $x - y$ 的测量还是 $X - Y$ 的测量。玻普也单独一人作了同样的选择。

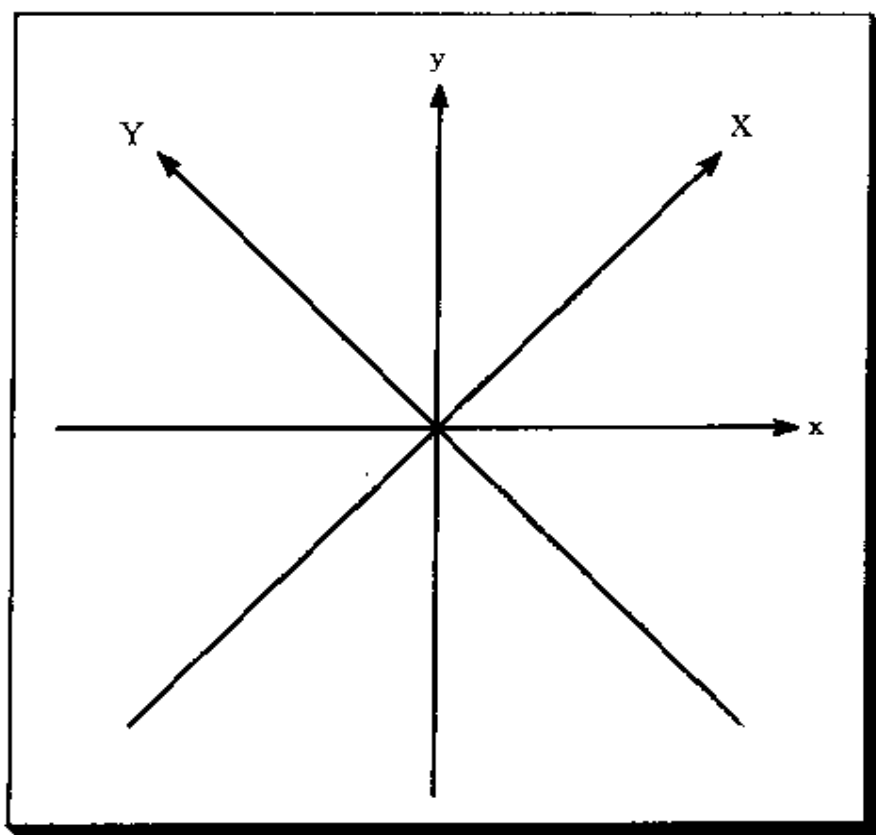


图 12—1 用于量子密码中的平面偏振轴

上述过程结束后,阿丽丝告诉玻普,她选择了哪种测量她的每个光子的方式, $x-y$ 或 $X-Y$;玻普也给了爱丽丝类似的信息(这种对话可以通过公用电话,被间谍偷听到了也毫无关系)。他们知道在何种情形下他们两人用了相同的测量(大约有一半时间发生)。由于 EPRB 效应,对每个同样的测量,阿丽丝和玻普得到的结果一定完全相同。而这些同样测量的结果,却只有阿丽丝和玻普两人知道,其他任何人都不知道(当然假定每人都秘密地进行测量,并且不宣布测量结果)。这些结果可以用一串 1(代表 x 或 X)和一串 0(代表 y 或 Y)来表示,这也只有他们两人知道。这些数串可以作为不可识破的密码基础,在他们两人中使用。

如果他们两人对安全性还不放心,他们可以废弃少数他们共同测量的结果,在公共电话中比较一下对应的一些 1 和 0 是否真的一致。其他剩下的 1 和 0 串仍可继续用于秘密通信。任何一个间谍如果设法知道了他或她的测量光子的方法,这间谍将会破坏阿丽丝和玻普结果的完全一致性。但只要把这些结果中一部分作一比较,这间谍的破坏就被暴露了。

量子密码并不真地需要 EPRB 效应。后来,由 6 个物理学家(包括贝纳特)组成的一个小组,发明了一个更聪明的程序,这个程序的实质仍然是利用 EPRB 效应。他们毁掉一个光子,又在另一地方创造一个有相同偏振态的光子(即利用空间不同的概率分布)。

当我们越来越熟悉基本粒子系统时,在被实验揭示的明显复杂性和理论所得到的简单性之间,就有一种令人注意的相互关系越来越明显地显示出来。许多不同种类粒子的发现,以及它们之间不同类型的相互作用的发现,使人们产生和加强了一种印象:粒子物理学越来越复杂。但与此同时,在理论物理学中,在向着粒子和相互作用的统一描述的进程里,发现了越来越明显的潜在的简单性。虽然粒子物理学还远没有一个世纪的历史,但我们可能已经处于这样的阶段:粒子物理学的统一已初现端倪,一个单个的原理可望预言基本粒子已观察到的多种多样性的存在。

第十三章 夸克和其他：标准模型

所有有关基本粒子的值得尊重的理论，都是在量子场论的框架里完成的，其中包括标准模型和超弦理论两者。量子场论的基础有三个前提：量子力学的有效性，爱因斯坦相对性原理（不包括引力的狭义相对论和包括引力的广义相对论）的有效性和定域性（locality，意指所有基本力都由定域过程引起，而不是超距作用引起）。这些定域过程（local process）涉及到粒子的发射和吸收。

QED——量子电动力学

量子场论第一个成功的范例是量子电动力学（quantum electrodynamics, QED），它是电子和光子的理论。电子是一种费米子（即遵守泡利不相容原理），它具有一个基本电荷单位（用“负号”标记，这是本杰明·富兰克林发明的）。光子是一种玻色子（即不遵守泡利不相容原理），它呈电中性。

在量子电动力学里，在电子间的电磁力起源于一个电子发射

光子,而另一个电子吸收这个光子。如果你懂得一些经典物理学,你一定会反对一个电子发射一个光子(即一个电子转变为一个电子加一个光子)因为这违背了能量守恒定律,或动量守恒定律,或同时违背了这两个守恒定律;同样,你也会反对电子吸收光子。但是,如果你懂得一些量子物理学,你也许会知道,能量只是在一个长的过程中守恒,而不一定在有限时间间隔里也守恒。量子力学的这一个特点,可以视为海森堡不确定性原理用到能量和时间上的一种表现形式。系统可以先借一点能量让电子发射一个光子,过一会儿,当另一个电子吸收光子时又归还这借来的能量。这个过程被称为两个电子间一个光子的“虚”交换(“virtual”exchange)。光子的发射和吸收只是量子力学的匹克威克意念*。

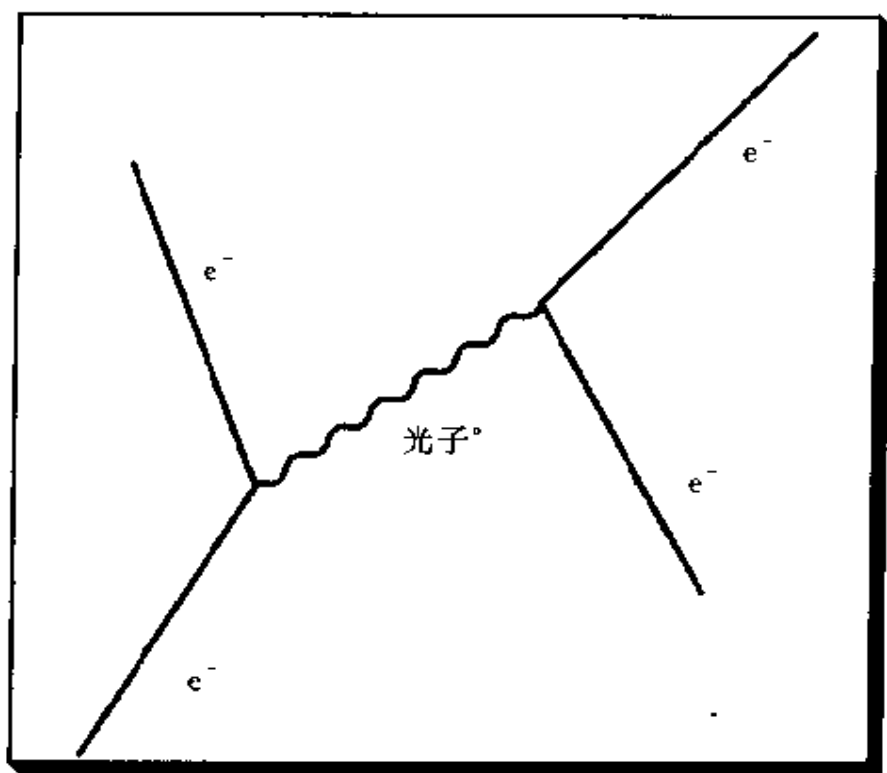


图 13—1

两个电子转换为一个虚光子,从而引起两电子间的电磁力

* Pickwickian Sense, 匹克威克是英国作家狄更斯写的《匹克威克外传》中的主人公,他天真朴实,但喜欢想入非非——译者注

对任何量子场论，我们可以画一些奇特的小图，使我们能够形象地了解正在发生的事。它是由已去世的一位同事狄克·费曼发明的。图中两个电子正在虚交换一个光子，从而使它们之间发生电磁相互作用力。每一个电子用 e^- 表示，指出它带有一个单位的负电荷。光子用一个 $\circ$ 标记，表示它的电中性。 e^+ 表示正电子，它是电子的反粒子。但是，什么是反粒子呢？

正反粒子对称

量子场论的发展，暗示了一种在基本粒子系统中的基本对称性，即粒子和它的“反粒子” (antiparticles) 之间的对称性。每一个粒子都有一个相对应的反粒子，反粒子的行为就像该正粒子在时空作退后的运动。反粒子的反粒子就是粒子自身。如果两个粒子是各自的反粒子，那么它们就有相反的电荷（电荷大小相等但符号相反）和相同的质量。电子的反粒子称为正电子 (positron)，因为它带有正电荷。有些电中性的粒子，如光子，是它们自己的反粒子。

当狄拉克在 1928 年提出他的电子相对论性方程时，他为量子电动力学的发现铺平了道路，不久，量子电动力学就迅速发展起来。狄拉克方程的解释指出必需要有正电子，但实际上狄拉克开始并没有预言这样一个粒子的存在，他只是指出应该有某种带正电荷的物体，它可能与质子一样。质子已由实验被证实，但它比电子几乎重 2000 倍。几十年以后，我问他为什么不直接预言正电子，狄拉克用他通常那种简练的方式回答说：“纯粹是胆小 (pure cowardice)。”

以后留下的事是由实验物理学家去发现正电子。1932 年，正电子由我的已去世的加州理工学院同事卡尔·安德森 (Carl Anderson) 和英国的布莱克特 (Patrick Blackett) 在实验室中发现了；几年后他们共同获得诺贝尔物理学奖。他们的实验建立在这样一个基础上：量子场论的正反粒子的对称性是一种真实的现象。

在很大程度上，标准模型可以看作是量子电动力学的一种推广：电子和正电子被很多其他正反费米粒子对补充，而光子被其他一些量子补充。正如光子是电磁力的载体或量子一样，其他量子则携带其他一些基本力。

夸 克

很长一段时间里，人们认为粒子在基本费米子表上除了电子以外，就只有组成原子核的质子和中子了。但是这种认识是错误的，中子和质子不是最基本的。物理学家们知道，以前人们认为基本的东西后来被证明是由更小的东西组成。分子是由原子组成的。原子虽被希腊人认为是不可分割的，也被证明是由核和绕核旋转的电子组成。后来，核又被证明是由中子和质子组成，这是1932年在发现中子后才开始明白的。现在我们又知道，中子和质子也有它们自己的组成部分：它们是由夸克组成的。现在理论物理学家们确信夸克类似于电子。（如果夸克被证明还有组成成分，那么电子也同样还有组成成分。不过在今天看来还似乎不大可能。）

1963年，当我把核子的基本成分定名为“夸克”(quark)时，我首先只念出了这个词，并没有一个字母一个字母地拼音，这个词似乎应该是“kwork”(柯克)。后来当我偶然读到詹姆斯·乔伊斯(James Joyce)的小说《芬尼根彻夜祭》(*Finnegans Wake*)时，我在“对着马斯特·马克的三声夸克”这句话中得知了“夸克”这个词。既然“夸克”(只代表一种鸥的叫声)明显地与“马克”、“巴克”(bark, 狗叫声)以及类似的词押韵，于是我有了藉口把它读得像kwork。但乔伊斯的小说讲的是一个叫汉弗瑞·欣登·爱尔威克的酒吧老板的梦想，因此正文中的一些词，就典型地由几个出处引出，就像《镜中世界》(*Through the Looking Glass*)*里的一些由两

* 《镜中世界》由英国作家刘易斯·卡罗尔作，中译本为《爱丽丝漫游镜中世界》

个字组成的混合词一样。有时,在书中出现的词竟成了酒吧喝酒人的呼声。因此,我坚持认为这也许是多种叫声中的一种,“对着马克先生叫三声夸克”也许是“对着马克小姐要三夸脱(啤酒)”。这样,“kwork”的发音也不能说完全不合理。但不论怎么说,数字3完全适合自然中夸克的状态。

由夸克组成一个中子或质子的秘诀,粗略地说就是“叫三声夸克”。质子由2个“u夸克”(亦名上夸克)和1个“d夸克”(又叫下夸克)组成,而中子由两个“d夸克”和1个“u夸克”组成。u和d夸克带有不同数量的电荷。在同样的单位时,电子有一个电荷(-1),质子也有一个电荷(+1),而中子的电荷为0。使用同样的单位,u夸克的电荷为 $\frac{2}{3}$,d夸克为 $-\frac{1}{3}$ 。显然,对质子来说, $\frac{2}{3} + \frac{2}{3} + (-\frac{1}{3}) = 1$,正是质子的电荷数量;对中子来说, $(-\frac{1}{3}) + (-\frac{1}{3}) + \frac{2}{3} = 0$,这也正是中子的电荷数量。

u和d夸克有不同的“味”(flavors)。除了味以外,夸克还有另外一个重要的特点,称为“色”(color)。这儿所说的味,并不是真正冻奶酪的味,色也不是真正的颜色。色的名称几乎是一个玩笑,只是用来作一种隐喻。色有3种:红、绿、蓝,这只是仿效人的色觉理论中有3种基本色(在绘画时,3原色常常说成是红、黄、蓝,但在人观察混合光的效应时,黄色被绿色代替)。组成一个中子或一个质子的秘诀是,每个夸克应有3种颜色的夸克,即红、绿、蓝夸克各一,这样,各种颜色就消失了。因为,在视觉里白色可以看成是红、绿、蓝3种光的混合光,我们可以用此作为隐喻,说中子和质子是白色的。

被禁闭的夸克

夸克有一个非同寻常的性质,它永远被囚禁在“白色”粒子(如中子和质子)之中。只有白色的粒子可以在实验室里直接观测到。可观测到的粒子的颜色在混合时消失了,只有在这些白色

粒子内才能存在有色物体。正如可观测物体的电荷总是一个整数（如 0, 1, -1 或者 2 等等）一样，带分数电荷的粒子只能存在于白色粒子内部。

当我提出夸克的存在时，我从一开始就相信它们将以某种方式永远囚禁着。我把这些囚禁的夸克作为“数学上的”夸克，我对这个术语作了小心的解释，而且将它与“真实的”夸克相对照（“真实的”夸克可以单独出现，因此可单个地被探测到）。如此注意语言选择的原因，是我不想面对哲学上的争论。一些有哲学爱好的批评家会提出：如果夸克总是躲藏着，怎么能称夸克是“真实的”呢？但这个术语最终还是十分令人遗憾。很多作者，完全忽视我对“数学上的”和“真实的”两个术语所作的解释，还忽视下面我将描述的事实（这一事实在现在已被普遍公认为是正确的），硬说我并不相信夸克的存在。一旦这种误解在通俗作品里出现了，就会使误解永远存在下去，因为许多作家会简单地相互抄袭。

丰富多彩的胶子

由于夸克被禁闭，那么它们之间的力一定不同于我们熟悉的电磁力。这种不同是如何产生的呢？

两个电子之间的电磁力是由于光子的虚交换所引起，那么夸克能束缚在一块一定也是由于交换另一种量子而产生一种力的缘故。这种量子称为胶子（gluon），因为它能像胶一样把夸克粘在一起，成为像中子和质子一样可以观察的白色物体。胶子对味毫不理会——我们可以说胶子是“味盲”（flavor-blind），它们对色十分敏感。事实上，色（color）对胶子起的作用，犹如电荷对光子起的作用，即胶子与色的相互配合和光子与电荷的相互配合一样。

与光子相比较，色的三色性要求胶子有不同的特性：对不同的色，有不同的胶子。在图 13—2(a)中，一个红色夸克在虚发射

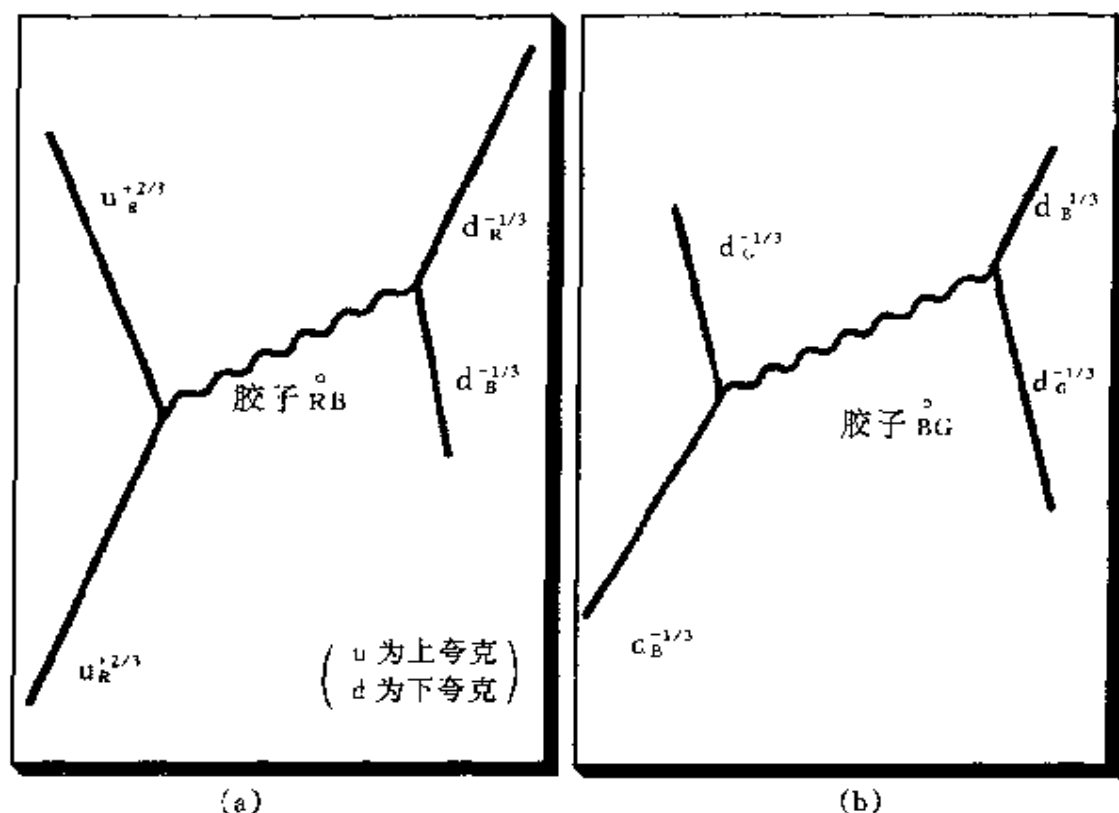


图 13-2

由交换胶子引起的夸克间的力

R—Red, 红
 B—Blue, 蓝
 G—Green, 绿

一个红—蓝胶子后变为一个蓝色夸克,而这胶子被一蓝色夸克虚吸收后,这蓝色夸克就变为一个红色夸克。在图13-2(b)中一个蓝色夸克在虚发射一个蓝—绿胶子后变为一个绿色夸克,而绿色夸克虚吸收了这个胶子后变为一蓝色夸克。(顺便说一下,胶子的反粒子也是一个胶子,例如,蓝—绿和绿—蓝胶子是彼此的反粒子。)在图中选择不同味的夸克(即上、下夸克),以说明味和发射胶子的色过程无关。

量子色动力学

大约在1972年前后,我们中的许多人致力于系统地阐述一个确定的有关夸克和胶子的量子场理论。我称这一理论为量子色

动力学 (quantum chromodynamics, QCD), 其中 chromo 是希腊文一个词根, 意思是 color (色)。这个理论似乎是一个正确的理论, 大家都这么认为, 但是还有大量的数学计算工作等着我们去做, 只有做完了这些计算, 我们才能得知理论的定量预计是否与观测相一致, 即能否证实夸克、反夸克和胶子 (所有的核物体如中子和质子均由它们构成) 真的按量子色动力学的规则运动。

为了比较量子电动力学 (QED) 和量子色动力学 (QCD), 我们可以作一个图表来说明。在 QED 里, 电子和正电子通过光子的虚交换而相互作用, 而在 QCD 中, 夸克和反夸克类似地通

		QED	QCD
费米子	e^-		$u_R^{+2/3} \quad d_R^{-1/3} \quad \dots\dots\dots$
			$u_G^{+2/3} \quad d_G^{-1/3} \quad \dots\dots\dots$
			$u_B^{+2/3} \quad d_B^{-1/3} \quad \dots\dots\dots$
量子(玻色子)	光子 [*]	光子 [*]	多色的胶子 [*]
费米子	e^+		$\bar{u}_R^{2/3} \quad \bar{d}_R^{-1/3} \quad \dots\dots\dots$
			$\bar{u}_G^{2/3} \quad \bar{d}_G^{-1/3} \quad \dots\dots\dots$
			$\bar{u}_B^{2/3} \quad \bar{d}_B^{-1/3} \quad \dots\dots\dots$

夸克和反夸克
彼此为反粒子

图 13-3

QED 和 QCD 的比较。夸克和反夸克可以通过它们的电荷和光子耦合, 但电子和正电子却不与胶子耦合。

过胶子的虚交换而相互作用。电磁力起源于电荷；我们也可以设想色力起源于色荷（color charge）。电荷和色荷都守恒——电荷不能被创造也不会被毁灭，色荷也如此。

但是，这两个理论之间有一个关键的不同处：在 QED 里携带电磁相互作用的光子是电中性的，而携带色力的胶子却是多色性的。由于胶子都有色，所以它们之间的相互作用就与光子不同，由此可知，QCD 的方程与 QED 的不会相似。现在已经知道，色力与电磁力或其他以前我们知道的力大不相同，色力在大距离并不衰减。QCD 的这一特性可以解释何以带色的夸克和反夸克以及多色的胶子，总是禁闭在诸如中子和质子这样的白色客体里。色力的作用有些像一根弦把它们束缚在一起。

虽然夸克永远被禁闭而不能在实验室里被直接探知，但人们在一些漂亮的实验里，证实质子中有夸克的存在。例如，一束高能电子流可以用来当作电子显微镜，探测质子的内部情形，而且它使人们确信夸克的存在已被证实。当我的朋友泰勒（Richard Taylor）、肯德尔（Henry Kendall）和弗里德曼（Jerry Friedman）为这样一个实验而获得诺贝尔物理学奖时，我感到非常高兴。（我只不过想说明，我事先就注意到这个实验是证实夸克存在的一个好办法。）

QCD 显示的简单性

在一个原子核里，中子和质子被束缚在一起（但它们并没有受到监禁，可以独立地分离，不像夸克那样被囚禁）。现在已经知道，这些粒子由夸克组成，那么这些粒子间的核力如何描述呢？当我还是一个研究生时，这种力还是一个有待解决的伟大秘密。现在，大部分理论物理学家们都相信，QCD 已经给出了答案，虽然有关的计算决不能说完毕了。这种情况颇有点像原子或分子间的力的情形，虽然人们早就相信这种力，但直到 20 世纪 20 年代晚期才由于量子力学的发现而得到解释；这种力绝非基

本力，而仅仅是电磁力（用量子力学方法处理）的间接结果。同样，核力也不是基本的力，而是色力的一种间接效应，这种色力也是由于夸克-胶子相互作用而产生。

中子和质子虽然被了解得非常透彻，但它们并非唯一可以观察到的（白色）核粒子。从 40 年代晚期，首先在宇宙射线实验中粒子高能碰撞时发现核粒子态，后来在高能粒子加速器中也发现核粒子态，至今已发现几百种核粒子态了。现在，它们统统可以看成是由夸克、反夸克和胶子组成。夸克这个图式体现了量子色动力学明确的动力理论，揭示了表面上非常复杂的态模式（pattern of states）下潜藏着的简单性。而且，这些态都是用“强相互作用”（strong interaction）彼此相互作用，在这种相互作用里包括核力。强相互作用的许多表现，都可以看作是基本的夸克-胶子相互作用的间接结果。量子色动力学揭示了强相互作用和核粒子态（这种相互作用的参与者）的简单性。

电子和电子中微子——弱相互作用

虽然核粒子和它们的组成部分十分重要，但还有一些更重要的问题。例如，电子并不具有色，也不关注色力或由此引起的核力。在一个重原子中，绕核旋转的最里层的电子，实际上很多时间在核里运动，这样它自然地要感受到质子由电磁效应引起吸引力，但它感受不到核力。

虽然电子不具有色，但它却有味。正如 d 夸克有 u 夸克作为它的味伙伴一样，电子也有电子中微子作它的伙伴。电子中微子似乎是一个非常安静的伙伴，因为它电中性，不仅感受不到核力（如电子那样），而且也感受不到电磁力。例如，它可以穿过地球，而相互作用的概率很小很小。由太阳热核反应产生的中微子，在白天像雨一样落到地面，到晚上它们则穿过地球从地面冒出来。当作家厄普代克（John Updike）从书中得知中微子的行为时，他在“宇宙的烦恼”（Cosmic Gall）一诗中写道：

中微子多么渺小，
没质量微不足道。
没有电荷，
对谁也不干扰。
地球是个傻大个，
驰骋穿过自逍遥。
无论气体多特异，
还是铜墙铁壁挡，
它进退伸缩真自如，
穿过了地球，
还回头礼貌一笑。
深夜它从床底飞出，
穿过梦中人的身体，
惊动不了一丝一毫！
啊，我说
这宇宙真令人烦恼，
你却道：
世事真无限奇妙！

(为了满足科学性，上面第4行诗应改为“对谁也几乎不干扰”。)

遗憾的是对太阳中微子的探测，仍然存在许多问题。测得的比率比预言的要低，这使得物理学家们提出了各种各样的解释，这些解释的可信程度也各种各样。我的同事福勒（Willy Fowler）有一次竟然提出，太阳中心的核熔炉也许在以前什么时候已经熄灭了，而太阳内能量的传递机制非常之慢，以至熄灭的信息仍未传到太阳的表面。没有多少人相信这是一个正确的解释，但是，如果它真是一个正确的解释，那我们在某一天将会面临真正的能源危机了。

如果中微子既不受强力的作用又不受电磁力的作用，那么它

怎么会在太阳的中心产生，我们又怎么能在地球上的实验室探测到它呢？这就需要另一种力，即所谓的弱力（weak force）。电子中微子和电子都参与了这种相互作用。正因如此，我修正了厄普代克的诗句（“do not interact at all”）。

弱力按下面方式引起相互作用：

1. 当质子中的一个电子变为一个电子中微子时，这个质子同时就变为一个中子。这个反应是中微子何以产生的一个范例。这儿提到的质子是一个重核的一部分，电子是绕核旋转最里层电子中的一个，这轨道上的电子有相当一部分时间在核里运动。

2. 相反的过程，即一个电子中微子转变为一个电子，同时一个中子转变为一个质子。这个反应说明一个中微子如何能被探测到，因为中子靶就在核内。

既然中子和质子都不是基本的，那么，上述反应就还不是基本过程，最基本的过程应涉及到夸克：

1. 一个电子转变为一个电子中微子，同时一个 u 夸克转变为 1 个 d 夸克。

2. 一个电子中微子转变为一个电子，而一个 d 夸克同时变为一个 u 夸克。

在电子转变为电子中微子（或相反）和 u 夸克转变为 d 夸克（或相反）的这些反应里，都涉及到一种味的改变。如量子场论中任何这种过程一样，在这些反应过程中一定有一个量子进行了交换。对两个反应中的任一个（其中第 1 个反应如图 13—4 左图所示）都在相同的费曼图中有两种形式；一种形式涉及交换带正电荷的量子，而另一种则涉及交换带负电荷的量子。这种量子的存在 50 年代晚期被提出，25 年后在 CERN 被鲁比亚（Carlo Rubbia）和范德米尔（Simon van der Meer）在实验中发现，他们两人因此获得诺贝尔物理学奖。这个量子通常被称为 W^+ 和 W^- ，这是李政道和杨振宁在一篇著名的论文中指定的名称，但我和费曼仍然经常用 X^+ 和 X^- 来表示。

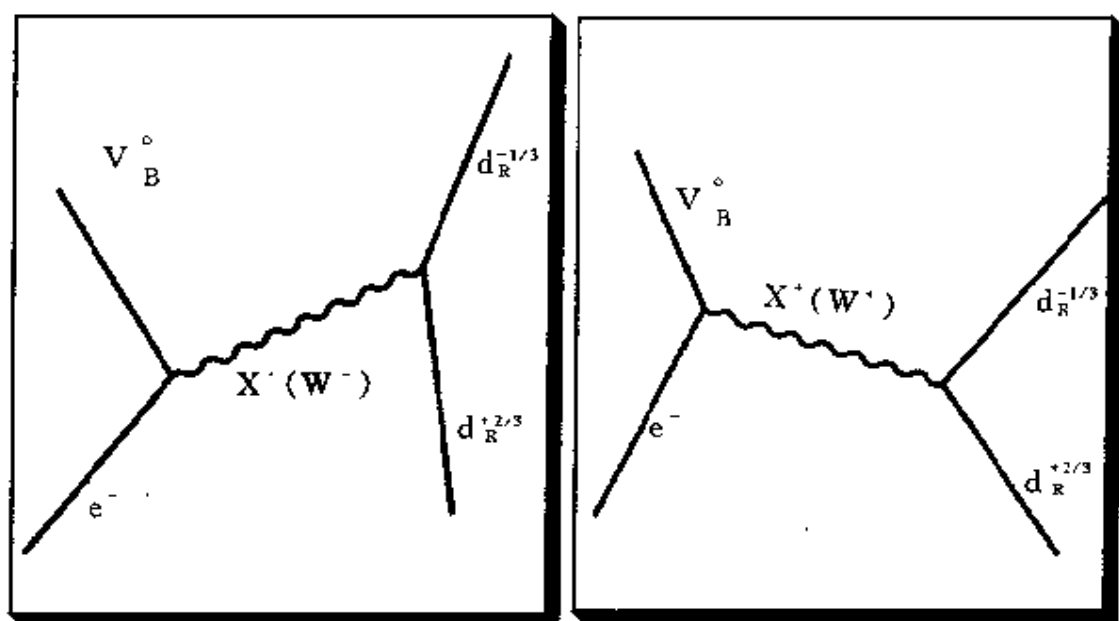


图 13-4

一个电子转变为一个中微子，同时一个 u 夸克转变为一个 d 夸克。相同费曼图的两形式

量子味动力学和中性弱力

电磁力和弱力都可以看作是味力 (flavor force)，这是因为电荷随味一起变化，而弱力则涉及到味的改变。在 50 和 60 年代，量子味动力学 (quantum flavor dynamics) 被提出来了，它将量子电动力学和一种弱力理论综合起来研究。格拉肖 (Sheldon Glashow)、温伯格 (Steven Weinberg) 和萨拉姆 (Abdus Salam) 对量子味动力学作出了特殊贡献，他们利用这个理论成功地预言有一种新的味力存在，它使得电子中微子在中子或质子上发生简单散射 (simple scattering)：在这过程中味不发生变化。

如果用夸克的概念，则这新力引起电子中微子在 u 和 d 夸克上发生散射，同样，味不发生任何变化。这种散射发生时要交换一个新的电中性的粒子，称为 Z^0 (如图 13-5 所示)。这个量子的存在同样由鲁比亚、范德米尔和他们的同事所证实。

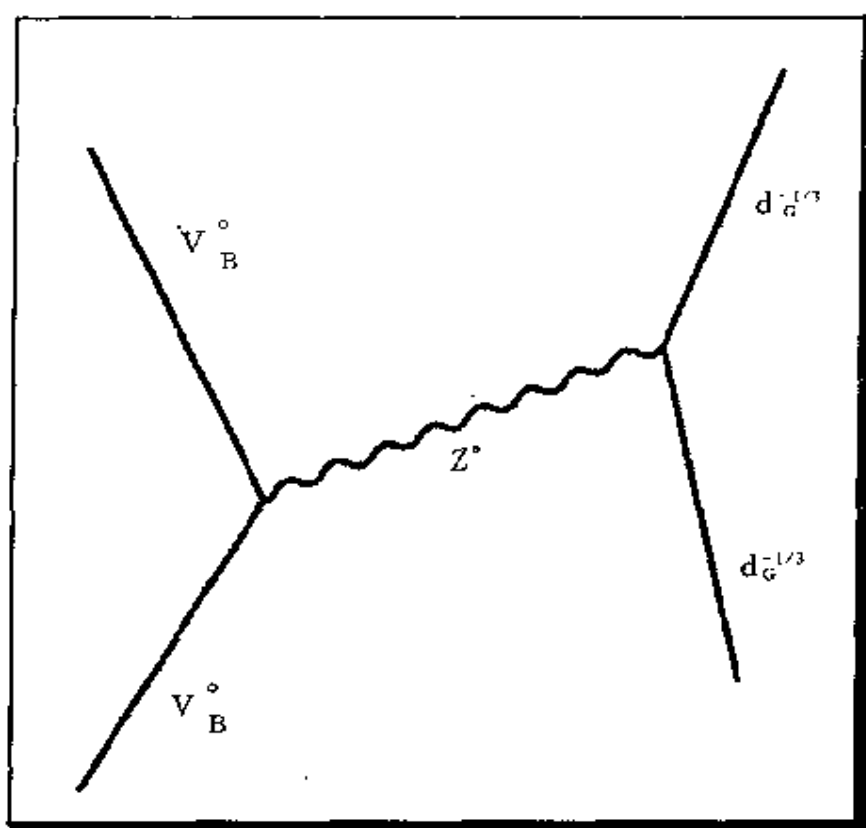


图 13—5 一个电子中微子 (V_B^0) 在一个夸克上形成散射

费米子家族

下面的图表总结了我们所谈到的粒子和力。这是一个费米子家族，它由电子和电子中微子、两味三色夸克组成；还有一个相应的反家族，由正电子和反电子中微子、两味三色反夸克组成。与之相关的色变量是量子色动力学中的多色胶子；这色变量不存在于电子、电子中微子和它们的反粒子中。与味变量有关的是量子色动力学中的 4 个量子。

事实证明，费米子家族不只一个，还有两个这样的家族，它们有类似的结构。每一个家族都由一个类似电子的粒子、一个对应的中微子和带有电荷 $-1/3$ 和 $+2/3$ 的两味夸克（分别类似 d

和 u)。

e^-	ν_e^0	
$d_R^{1/3}$	$u_R^{+2/3}$	由多色胶子 ^a 所携带的色力 量子色动力学
$d_G^{-1/3}$	$u_G^{+2/3}$	
$d_B^{-1/3}$	$u_B^{+2/3}$	
由光子 ^a 、 X^+ 、 Z^0 携带的味力 量子味动力学		

我们讨论过的基本粒子和力（为了简单性的缘故，费米子的反粒子从图表中删除了）

在第二个费米子家族里，与电子类似的粒子是 μ 介子 (muon)。1937年它被加州理工学院的 C. 安德森和尼德迈耶 (Seth Neddermeyer) 发现。 μ 介子是电子的一种重的变体，比电子大约重 200 倍，它的中微子叫 μ 子中微子。这一家族的夸克叫 s 夸克（或“奇异”夸克，strange，它类似于 d ）和 c 夸克（或“魅”夸克，charmed，它类似于 u ）。像 μ 子一样，这些夸克比第一家族的夸克要重一些。

第三费米子家族也知道了，由 τ 子 (tauon，重为 μ 子的 20 倍)、 τ 子中微子、带 $-1/3$ 电荷的 b （或“底”，bottom）夸克和至今尚未发现的带有电荷 $+2/3$ 的 t （或“顶”，top）夸克构成*。如果实验物理学家们在现在得到的能级范围里还找不到顶夸克，那我们理论物理学家就不得不“把责任落到我们的自来水笔上”（我以前的同事戈德伯格常这么说）。不过，现在自来水笔已经少见了。除此以外，古代罗马英雄在被打败了后想自杀时，一个可靠的侍从就会抓住他的剑不让他自杀，现在不大清楚一个

* 顶夸克已于 1995 年由美国费米实验室发现——译者注

研究生能否把一支笔抓得足够牢靠。

除了已知的费米子家族以外，还有没有额外的费米子家族呢？最近一个关于 Z^0 量子衰变速率的实验，有助于说明这个问题。理论物理学家的预言允许 Z^0 衰变为三种中微子-反中微子对中的任何一对（这三种分别是电子、 μ 子和 τ 子），实验与这一预言相符。这说明不会有第 4 种中微子，除非它有巨大的质量，不像另 3 个那么轻。因此第 4 个家族被排除了，除非它的中微子非常不同于已知的 3 种。

有了三个费米子家族和它们的反粒子，以及电磁、弱和胶子相互作用的量子，关于标准模型的描述几乎就结束了，但还有一个有关 QCD 很好的简单明了的推广。光子伴有其他一些量子，电子伴有其他一些费米子。这些量子 and 费米子的图像（包括它们变化的质量和以量子为媒介的力的强度的变化），显示出某种明显的复杂性。但标准模型还不是基本的理论，只有在基本的层次上，潜藏的、充分的简单性才可能揭示出来。

零质量近似

有一个办法可以得到标准模型不具有的简单性，那就是对所有我们讨论过的粒子都采取一种近似的考虑，假定它们的质量都近似为零，这也就是说这些粒子都以光速运动，而且永远不能静止。当弱相互作用的量子被视为没有质量的时候，则 3 种相互作用就具有基本的相似性。量子味动力学和量子色动力学有相近的数学结构，它们都属于同一类理论，即所谓的规范理论（gauge theories），或称杨-米尔斯（Yang-Mills）理论（如像格拉肖和我多年前的推广一样）。

当费米子的质量设定为零时，在费米子的对称性中许多对称性出现了。特别是 3 个家族有了同样的特性。

问题立即又出现了：零质量近似是如何被打破的？在描述产生非零质量的机制以前，我们先来看看几个实际的数值。

大和小的质量（或能量）

在论及质量或能量时，最根本的是要利用爱因斯坦的质能关系式，这个关系式指出一个非零质量的粒子在静止时，它具有的能量等于它的质量乘以 c （光速）的平方。质量和静止能量的等价性可以用来确定：能量等价于任何质量。当中子和质子像这样转化为能量时，这两个粒子都用 GeV 这样的能量单位表示。这儿的 G (giga-) 指的是 10^9 ；一个 GeV 是一个静止的电子在电势差为 10^9 伏电场中加速时所得到的能量。这是一个很方便的单位，尤其是测定与粒子质量等价的能量时，更是十分方便。

在标准模型中，基本粒子的非零的质量可以彼此很不相同。电子的质量大约是 $2 \times 10^{-2} \text{GeV}$ ；中微子的质量如果实际上不为零，则为 10^{-8}GeV ； τ 子的质量近似为 2GeV ； $X^\pm$ （或 $W^\pm$ ）和 Z^0 玻色子的质量接近 100GeV 。最重的夸克是 t 夸克，估计质量为 170GeV 。所有这些质量破坏了零质量近似所具有的特殊对称性。

自发对称违背

是什么原因使得这些质量成了非零的，又是什么原因使得它们如此的不相同？这种作用的机制在标准模型里，至少部分明白了。这与一种（或几种）新的玻色子的存在有关。至少有一个这种类型的玻色子在现有的能量下可以观察到，或者不久将会在 CERN 的加速器上可以观察到。这种玻色子称为希格斯玻色子 (Higgs boson)，也简称为希格斯子 (Higgson)。这个玻色子不仅仅只是爱丁堡的希格斯 (Peter Higgs) 具体讨论过，而且被几位其他粒子物理学家用不同的方法讨论过，其中包括吉玻 (Thomas Kibble)、布劳特 (Robert Brout)、恩格勒特 (Francois Englert)。另外，在更早一些的时候，我的朋友安德森 (Philip

Anderson) 曾概略地提到过它。安德森是一位凝聚态方面的理论物理学家，现任圣菲研究院科学委员会的副主席；他因为在凝聚态方面的工作获得过诺贝尔物理学奖，但他关于希格斯玻色子一般性思想的预言，却得不到基本粒子物理学家们的广泛承认。我不免私下起了疑心，如果他的贡献得到更普遍的承认，他或许就不会在公众面前反对建造新的粒子加速器。他强烈地反对为寻找安德森-希格斯或者希格斯-安德森玻色子（至少部分为此）而建造新的加速器，这里有什么其他方法吗？

为了公平起见，我建议“希格斯子”保持不变，但应采用“安德森-希格斯”表示打破零质量近似对称和造成标准模型中各种不同质量非零粒子的机制。安德森-希格斯机制是一种更普遍的自发对称破缺 (spontaneous symmetry breaking) 的特殊情形。

这种过程的一个熟悉的例子是一个普通磁铁的所有很小的原子磁体都一个接一个地排列着。组成磁铁的基本粒子的方程组（在内部相互作用但对外部没有影响）使得它们在空间方向上完全对称，这就是说，磁铁的指向对它们来说毫不相干。但任何外部的影响，无论多么微弱，例如一个非常弱的外磁场，都可以决定磁铁的取向，而在另外情形下这取向完全是任意的。

组成磁铁的粒子的方程组具有一种对称性，是因为所有的方向对它们都一样，但方程组的每一个解，由于指定了一个确定的方向而破坏了对称性。但是，所有这些非对称的解集却又具有对称性，因为每一个方向对应一个解，所有的方向集是完全对称的。

在这一特例情形下，自发对称破缺的本质在于：具有一特定对称性的方程组有各种解，每一个解破坏了对称性，但所有的解集却又是对称的。

自发对称破缺的安德森-希格斯机制的最大功能，是允许费米子和弱相互作用的量子获得非零质量，并且不会在量子场动力学的计算中引出灾难性的无限大。粒子理论物理学家曾经花费相

当多的时间寻找这样一个“温和的”(soft)机制,以得到非零的质量,但直到希格斯子出现才做到了这一点。

时间对称的违背

安德森-希格斯机制不仅能解决标准模型中非零质量的问题,而且对基本粒子物理学中时间逆转时所观察到对称性的小的背离,也能给出解释。这就是说,基本理论最基本的一些方程在时间逆转时应该具有对称性。的确,杂化超弦理论(heterotic superstring theory,基本粒子统一理论中唯一重要的候选者)就有这种对称性。这种对称性的违背是另一个例子,说明对称性方程组有一个非对称解的对称集,这正如大自然中发现的情形一样。在本小节所述的情形下,一定有两个解,分别代表不同的时间方向。

在基本粒子层次上时间对称的违背(violation of time symmetry),并不是在任何情况下都能解释时间之箭——最大的不同是在时间序列上,我们可以连续观察到事件向未来和过去(时间逆转)之间的运动。这种重大的不同起因于宇宙膨胀开始时特别的初始条件,正如我们已经提到过和以后还要更加详细讨论的那样。

物质-反物质对称性违背

如果要进行数学运算的话,时间向前和向后的更迭与左和右的转换联到了一起,物质和反物质的转变也是如此,这两者的合成运算(称为CPT)在量子场论里严格对称。这样,由于时间对称性的自发违背,那么物质和反物质对称性之间的违背就完全用不着惊讶了。这后一种对称性的违背能够解释我们周围世界总体的不对称性吗?在我们周围的世界中,各种物体都是由物质组成,而反物质只能在高能碰撞中偶而出现。

很多年以前，萨哈洛夫（Andrei Sakharov）提出了这个想法。已去世的萨哈洛夫由于（与泽尔多维奇一起）为苏联的氢弹提出了关键性思想而成为著名人物，后来他又为苏联的和平和人权进行了斗争。萨哈洛夫常常把别人认为还需要改善的许多思想汇集到一起来考虑，并常常由此得到一些新想法。这次也是如此。他的结论是在宇宙的最早期，物质和反物质是对称的，但立即通过与时间对称性自发违背同样的产生机制，产生了现在已有的物质和反物质不对称性。萨哈洛夫的建议，开始显得十分古怪，但在接下去的转换中它显得越来越好。这种自发对称违背似乎真是造成物质绝对超过反物质的主要原因。

自 旋

自发对称违背的安德森－希格斯机制中出现的希格斯子，是另一类玻色子，不同于胶子、弱和电磁相互作用的量子。一个非常重要的区别是它们的自旋角动量（简单地称之为自旋）不同。自旋是在数值上描述粒子绕自己的轴旋转的快慢。在量子力学里，自旋使用的是一个自然单位，用这种单位一个玻色子的自旋可以是 0、1 或 2 等等；而费米子的自旋则为 $1/2$ 、 $3/2$ 或 $5/2$ 等等。

所有标准模型中的基本费米子的自旋是 $1/2$ ；所有量子色动力学和量子味动力学中的量子，其自旋是 1。但是，希格斯子的自旋一定是 0。

怎么会有这么多基本粒子？

在观察中发现核粒子态巨大的多样性，一般归因于它们都是按量子色动力学的规则，由基本的夸克、反夸克和胶子合成的。但是夸克有 3 色 6 味，胶子有 8 种（不是 9 种）组合色，这样，其数量仍然太大了。而且，在强相互作用的核粒子领域以外，我

们又遇到了电子、 μ 子、 τ 子和它们各自的中微子。所有这些费米子都有与它们自身不同的反粒子。另外，还有光子、弱相互作用的3个中间玻色子（intermediate bosons）。标准模型所需要的希格斯子是基本粒子表中最后的一个粒子。

我们把这些数目加起来。18个夸克，3个类似电子的粒子和3个中微子，总数为24个费米子；加上它们的反粒子，则有48。还有我们知道的量子：8个胶子、光子和弱相互作用中的3个中间玻色子，总数成了60。再加上希格斯子，总数为61。

对于一个非专业的观察者来说，宇宙所有物质的基本定律竟然依靠这么大量而且复杂的基本客体，似乎颇令人不安的。基本粒子物理学的专家只好同意这种看法。要解决这个难题必须把标准模型并入一个较大的理论之中，这个理论包含较少的任意性，最好是所有粒子和它们的相互作用的一个统一理论。标准模型有大量实验事实支持，因此，任何统一理论在现时缺少观察的直接支持之时，只能看作是纯理论性的。一个统一理论当然必须是可试验的，这就是说，它应该提出一些可用观测验证的预言。但是，这样的一个统一理论如何处置标准模型中出现的那么多基本粒子呢？

似乎有3条路可走。第一，假定今日的基本粒子事实上也是合成的，物质的终极描述涉及到数量较少的一些新且真正基本的组元。我今天还不相信有任何理论或实验事实指出了这样一个方向。更有甚者，假定的新组元为了解释已知基本粒子的大量不同特性，它们的数量一定也相当多。因此，想减少基本客体的数量的做法，恐怕不会引人注目。

还有一个提出不久的相关想法认为，在上述第一种讨论过程中，即认为在一个层次上的似基本粒子由更深层次上更基本的粒子组成，可以永远这样推想下去。

第三种可能性是认为，有一个简单的理论是基本粒子系统的基础，这一理论认为这些基本粒子可以看成是无限的，但是在现在可以得到的能量情形下，只有有限数目的粒子可以被实验探测到。超弦理论（superstring theory）属于这种解释范围。

第十四章 超弦理论：终于统一了？

超弦理论（特别是杂化超弦理论），是历史上首次对所有基本粒子和它们的相互作用（即自然中所有的力）提出的一个严肃认真的建议。下一步要从这理论中得出一些预言，并与基本粒子中已知的（或即将测到的）事实进行比较。比较后出现了一个惊人的结果：方程中得出了特征能量或质量（普朗克质量），这样，超弦理论开始直接显出一种近于完整的统一性。但是，与实验室中可探测现象的能量尺度相比较，等价于普朗克质量的能量，又太大了。这样，在实验室多少可以直接研究的基本粒子，统统属于超弦理论中的“低质量部分”（low-mass sector）。

低质量部分

一群数量很大但又有限的粒子（例如 100 到 200 种），它们的质量低到在可预见的未来出现在加速器实验中。这些粒子和它们的相互作用构成超弦理论中的低质量部分。

所有其他粒子（它们有无限的数量）有巨大的质量，以至它们只能出现在虚效应里（例如量子虚交换时力的出现）。这些虚效应（virtual effect）中有些可能具有关键的重要性，例如它们可以使爱因斯坦的引力理论成为超弦理论的一部分，而且不会出现不完美的无限性。

标准模型，包括3个费米子家族和它们的反粒子以及已知的12个量子，构成这个统一理论的低质量部分的一部分。引力子和零质量，显然也属于这个低质量部分，如其他已预言的粒子一样。

标准模型的可重整化性质

标准模型有一个奇妙的特性，那就是可重整性（renormalizability），这使它与别的理论（例如引力理论）有所不同。这意味着在非常好的近似情况下，标准理论不会遇到无限大，而无限大会使计算变得毫无意义。统一理论的可重整化部分可以用于它自身，这几乎使它像一个最终的理论。但重整化也要付出一定的代价，那就是出现了超过一打以上的任意数值，这些数值不能计算出来，而只能由实验确定。这些数值说明这个模型与其他基本统一理论有依赖关系，包括高质量态的无限集。

与实验比较并非不可能

因为普朗克质量和低质量部分的非零质量之比是如此之大，致使少数理论物理学家和部分非专业的作者声称，超弦理论很难（或不可能）用实验检验。但这种说法是不正确的。有许多可能的办法使这个理论面对实验结果。

1. 首先，超弦理论在适当的极限情况下，可以预言爱因斯坦的广义相对性引力理论。自动地将爱因斯坦的引力耦合到一个统一的量子场论中去，而且没有遇到通常的困难（和无限大），

这已经是一个重大的胜利。

2. 另一个挑战是确定超弦理论能否在适当近似情况下，预言标准模型。

3. 我们记得在标准模型中有许多任意常数（参量），它们的数值应该可由超弦理论预言。

4. 超弦理论低质量部分还包含一些额外的新粒子，它们的预言性质可以由观测检验。

5. 特别是标准模型可以嵌入到一个较大的可重整化的模型中，而后一模型是低质量部分的一部分。这个较大理论的特性（包括描述粒子质量和相互作用的常数和粒子信息），可以与实验结果相比较。

6. 另外，高质量部分的虚效应可以引入对低质量部分的某些可观测到的修正。

7. 最后，超弦理论可以得到一些宇宙学方面的结论，而且可由天文观测验证。

所以，我们不必失望，而应寻找一些办法来把理论的预言与自然中的事实进行比较，但是，理论物理学家必须继续完成的困难任务是对这些预言进行提炼。

能量的基本单位和其他一些量

使超弦理论具有特色的巨大活力是什么？它们来自何处？巨大活力来源于能量的基本单位，它从自然中3个基本的普适常数导出：光在真空中的速度 c ，普朗克量子常数 h 和牛顿引力常数 G 。

常数 h 是任意辐射量子的能量与辐射振动频率之比。我们通常使用的是 $\hbar$ ，它是 h 除以 2π ，这儿 π 是我们熟知的任何圆的圆周长与其半径之比值。（W. 海森堡经常使用的领带别针上饰有 $\hbar$ 的图形，以表达他发现了量子力学的自豪感。）物理学家对这个符号是如此的熟悉，以致我的已去世的朋友、伟大而幽默

的数学家乌拉姆 (Stanislaw Ulam), 常常把他的名字写成 Stanislan, 好像 l 是 l 除以 2π 。

G 是牛顿公式中的一个普适常数, 这个公式表述任两个粒子间的引力, 这个力等于 G 乘以两粒子质量的积, 再除以它们之间距离的平方。(牛顿证明这个公式时, 用的是两个球对称的物体, 它们之间的距离是两球球心的距离, 它可以近似地用于太阳和行星和月亮这样的卫星。)

将 3 个普适常数 c 、 $\hbar$ 和 G 适当的幂作一些乘除, 我们就可以得到任意物理量的基本单位, 如长度、时间、能量或力, 这样得到的基本长度是 10^{-33} 厘米, 将这个长度除以光速 c 就得到时间的基本单位 10^{-44} 秒。

与此不同的是, 人们所熟悉的单位都是任意的, 它们并不是由自然中的普适常数构成。虽然英尺 (foot) 不再是 10 位在星期天最先离开教堂的 10 个穿鞋的脚的平均长度, 但它仍然不是基本单位。米也不是基本单位, 它原先是一个特定金属棒的长度, 这个棒放在巴黎附近一个拱形圆顶建筑物里, 现在米是氪原子在一特定激发态时发射的波长的某个倍数。

粒子质量和基本单位

质量的基本单位普朗克质量大约是 1 克的 10 万分之一。对人类尺度来说这质量似乎不大, 但对中子和质子尺度来说 (两者都近似 1 GeV) 却十分大——大约大 2×10^{13} 倍。改用基本单位后, 我们可以认为中子和质子的质量很小, 而电子更小, 约为中子和质子的 2000 分之一。为什么会出现这些很小的数值呢? 简短的答案是: 我们也不知道。杂化超弦理论并不明确地包含任何可调整的参量。如果它的确是正确的理论, 它就应该由它自己导出已知粒子质量对质量基本单位的比是一个小的比值。计算检验表明, 杂化超弦理论非常之好, 足使它成为经受最严格检验的理论之一。

迄今为止，只有一些线索指明这些小数值如何在理论中出现。一个还算明显的猜测是，有一个有用的近似，在这近似里所有低质量部分的粒子都被设定为零质量。对称破缺修正了这种（包括安德森-希格斯机制引入的）近似，导致这些粒子有很小但不为零的质量。有几个粒子的质量，包括光子和引力子，根本没有得到修正，故仍然为零。

现在实验中能得到的能量在 10^3 GeV 数量级上，很快可以提高大约 10 倍，但不会再高了。比起大约为 $2 \times 10^{13} \text{ GeV}$ 的能量基本单位，这仍然太小了。既然实验家们不能在实验室现有的加速器中产生质量高于现有能量的粒子，他们就只能一直处理属于低能部分的粒子。

超弦的意义

对于杂化超弦理论有关粒子方面的内容，我们能作出什么一般性观测呢？要回答这个问题，我们得谈到“弦”（string）这个字和前缀“超”（super-）的意义。

弦这个字指出，这个理论可以用小环（tiny loop）来描述粒子，而不用点来描述。每个环的典型尺度大约是长度的基本单位，约为 10^{-33} 厘米。这些环是如此之小，所以在很多情形下我们可以等价地用点粒子进行描述。实际上有无数种点粒子。这些不同的粒子如何与其他粒子发生关系呢？在特殊情形下，那些低能部分的粒子如何可以与普朗克质量差不多（或大一点）的粒子发生关系呢？

用小提琴的弦作类比十分恰当。小提琴的弦有一个最低的振动模式，还有无数更高的音频振动模式（谐波）。在量子力学里，能量是频率乘以普朗克常数（ $\epsilon = h\nu$ ）。低质量部分的粒子，可以形象地设想为是超弦理论中出现的各种弦环的最低振动模式。而质量与基本质量单位可以相比的粒子，则可表示为其他一些最低的振动模式，而较重的粒子则表示较高的振动模式，如此下去以

至无穷。

前缀“超”(super-)指出这个理论有近似的“超对称性”(supersymmetry),这意味着粒子表中的每一个费米子都有一个相应的玻色子,反之亦如此。如果粒子系统的超对称性是严格精确的,每个费米子一定有与其相关的玻色子精确相同的质量。但是,超对称要设法使自己“破缺”(对此我们尚了解得不够清楚),这使得费米子和相应玻色子的质量不一样,我们把这种现象称为“超隙”(supergap)。每一对费米子-玻色子超隙并不完全一样,但可能常常有相同的数量级。如果这超隙有些类似质量的基本单位,那我们就永远不可能在试验室里直接观测到已知基本粒子的超级搭档(superpartners)。

超级搭档和新的加速器

但是,如果与超隙等价的能量只有 10^2 — 10^3 GeV,那么在未来的几年,应该可能由CERN新建的加速器观测到这些超级搭档(如果更高能量的超导超级碰撞器建成,观测到的机会要更大一些)。某些实验结果的理论分析指出,超隙的大小可能正好和SSC(superconducting supercollider,超导超级碰撞器)的能量搭界,还可能与CERN的新加速器能量搭界。假设这些迹象是正确的,我相信发现超级搭档的前景,是建造新加速器所有具体动机中最令人激动的一个。(还经常有探索未知世界不太确定的目的,以及看一看是否会有什么未预见到的现象出现。)

应按照两个不同的模式,指定假定中的超级搭档的名称。当已知粒子是一个玻色子,相关的费米子则在名称的尾部加一个意大利文表示“小得多”的词尾“-ino”,这种模式首先由费米命名中微子(neutrino)。这样,光子(photon)预期的搭档就是光微子(photino),引力子(graviton)的搭档则为引力微子(gravitino),如此等等。既然传递弱相互作用的带有电荷的玻色子常称为 W^+ 和 W^- ,那么预言中相应的费米子就需要一种奇怪

的名称“W 微子” (winos)。当我们已知的粒子是一个费米子，其玻色子搭档就用与费米子相同的名称，但加一个前缀“s” (估计是代表 super——超)。这样，我们就得到了一些奇怪的术语，如 squark、selectron。(我应该强调，我对这些名称不负责任，虽然我必须勉强承认，当大家对已知玻色子的费米子选择后缀为 -ino 时，我也在场。)

既然一个玻色子的超级搭档是一个费米子 (以及相反的情形)，那么这两个超级搭档的自旋一定总是不同，一个是整数而另一个是整数加 $1/2$ 。事实上，两个自旋必需有 $1/2$ 的差别。希格斯玻色子 (或希格斯子，Higgson) 的自旋是 0，它的搭档 (higgsino) 的自旋为 $1/2$ 。费米子的 3 个家族自旋为 $1/2$ ，那么它们的搭档 (squark、selectron 等等) 的自旋为 0。量子 (胶子 gluon、光子 photon，X、W 和 Z^0 玻色子) 的自旋为 1，它们的搭档胶微子 (gluino)、光微子等等的自旋则为 $1/2$ 。引力子 (graviton) 的自旋为 2，它的搭档引力微子的自旋为 $3/2$ 。

在超弦理论中，标准模型被耦合到一个更大的可以重整化理论之中。这一理论我们可以称为超标准模型 (superstandard model)，它包含 12 个量子，同样的费米子，某些 higgsos 以及所有这些粒子的超级搭档。超级标准模型的有效预言，为检验超弦理论提供了大量的实验。

趋近普朗克质量

当能量增加到比低质量部分 (即可直接在实验中探测的部分) 的能量高许多时，超弦理论预言胶子、电磁和弱相互作用在强度上彼此趋近，还显示它们的紧密关系。归纳现在的高能实验结果，得到了超对称破缺预言中提出的相同结论 (如超隙不会太大)。这样，对超对称来说已经有了某些直接的证据。与此同时，费米子间的对称性也是不可否认的。

现在让能量继续增加。在能量间隔刚刚低于普朗克质量，并

在普朗克质量邻近处显示出第一个激发模态之前，超标准模型可否暂时让位给一个“大统一理论”（grand unified theory）的超对称形式。

虽然我们之中的任何人都不可可能活着见到在实验室里产生与普朗克质量（ $m_p \approx 10^{19} \text{ GeV}$ ）* 相比较的能量，但是，这种能量在宇宙开始膨胀的宇宙婴儿时期，一定出现过。时间的基本单位 $t_p \approx 10^{-44}$ 秒，它可以用来测量这样一个时期：小小的宇宙经历了所有超弦理论预言的物理效应。那么，宇宙有没有任何遗留下来的证据，以便今日来检验超弦理论的有效性呢？超弦理论预言的效应从遥远的时代至今，是否会留下痕迹？

理论物理学家尚未能确信会不会有痕迹遗留下来。在膨胀开始一个很小的时间间隙后，几乎肯定有一个暴胀（inflation）时期，这是一个宇宙爆炸似的膨胀时期，接着是延续至今和仍将继续下去的平缓的膨胀。暴胀几乎毁掉了宇宙极早期的许多特征，因此也可能扼制了超弦理论的许多推论。但是，强加于暴胀的一些制约，也许毕竟可以用宇宙学方法使理论得以检验。

同样的道理可以用于宇宙的初始条件，按照哈特尔和霍金的建议，初始条件与统一的量子场论密切相关。假定他们两人的想法和超弦理论都正确，那么初始条件就被唯一地确定了，但它对宇宙后来的影响被暴胀过程过滤了一次。

解的明显多重性

除了超弦理论特征能量尺度与基本粒子实验可得到的能量相差太大以外，还有一个理由使少数物理学家对超弦理论能否验证表示怀疑。这主要是由于杂化超弦理论的方程有非常多的近似解。

别的暂时不说，只说每一个这样的解都提供了一个粒子表，

* m_p 代表普朗克质量，这个数值是译者附加上的——译者注

其质量均近似为零。我们似乎可以假定，当非零的小质量作了修正后，这些粒子和理论中组成低质量部分的粒子相同。于是，每个近似解的零质量粒子的主要内容可以与超标准模型相比较。某些解还的确取得了一致：低质量部分包含超标准模型和几个额外的粒子如引力子和引力微子。

麻烦的是，已经发现有几千种这样的近似解，而且看来还会不断有新的近似解发现。因此，被观测到的情形与超弦理论的一个解进行比较，并非根本不可能，但是，对所有其他解又如何处置呢？

这儿有几个可能的答案。第一，我们当然可以认为这理论错了，但仅从有过多的近似解就作这样严厉的结论，我看不出有什么道理。第二种可能性认为，困难完全起源于近似性（这种说法并不完全公正，只不过很方便），因此一旦改进了这种近似性，那么除了一个解以外，其他所有解均可认为是虚假的，并予以抛弃（这种可能性的一个修正形式认为，仅仅几个真正的解可以保留）。

作 用

为讨论多重解问题，还有一种可能的办法是引入一个非常重要的量“作用”（action），通常用符号 S 来表示。很早以前在经典的牛顿物理学中引入“作用”时，它就很有用处，但到量子力学出现以后，它就不仅是有用，而且成了不可缺少的量。作用的量纲等于能量乘以时间；而普朗克常数除以 2π ，即 $\hbar$ ，也有相同的量纲，因此可以把它当作作用的基本单位。我们知道，量子力学中粗粒化历史的概率，是把所有成对的完全精细历史量 D 值加遍。量子力学中的一个理论对每一个精细历史指定一个特定的 S 值，正是作用的这个值（加上初始条件）决定了 D 的值。

很清楚，我们高度希望在杂化超弦理论中找到确定 S 值的公式。但至今为止，这还只是一个难以达到的目的。今日我们能做

到的，如我以前的一位学生茨威巴赫（Barton Zwiebach）所得的一个结果一样，似乎只能把作用表示为一个无穷级数之和，而对这种系列求和仍然是一个难以完成的任务。

如果把上述情形，与我已去世的同事费曼在 1954 年完成的一次学术辩论作一比较，我们也许会得到启示。（1954 年，我访问加州理工学院并决定在这儿工作时，费曼和我讨论了他的计划。事实上，我自己也开始了一个与此类似的计划。）费曼开始设想，假定爱因斯坦在 1914 年前后，他睿智的洞察力并没有深入到引力的本质中去，也没有了解到引力必需服从广义相对论的不变性原理并与时空几何有关。这时狄克*问道：有没有可能不用这种洞察力，用强迫的办法建构这个理论？他发觉可以这样。但是，作用以一种无穷级数的形式出现，而对这个级数求和在没有任何几何观点和不变性原理的情形下，实际上不可能。而（广义相对论的）原理可以直接得出答案，既不需要任何强迫，也不需要无穷级数。事实上，只要爱因斯坦在广义相对论的基础上了解到，为了描述引力他需要什么公式，他是可以从他的一位老同学格罗斯曼（Marcel Grossman）得知有关数学知识，并写出作用的公式，而且，由这个公式可以推出 86 页的公式。

也许超弦的情形有些相似。如果理论物理学家了解超弦理论的不变性原理，他们也许可以写出短序列的作用公式，而用不着诉诸对无穷级数求和。（当我们等待这个发现时，我们将怎样称呼这个原理呢？陆军元帅相对论（Field marshal relativity）？大元帅相对论（Generalissimo relativity）？当然，这个理论会超过相对论。）但无论如何，对超弦理论有了深刻的了解，我们就会联手前进去发现作用 S 的公式。

如以前曾注意过的一样，自洽的靴带原理（“bootstrap” principle）曾首次激励过超弦理论，这种思想是一个简单而强有力的思想，但也并没有用正确的语言详细描述，因而未能发现作

* 费曼的朋友常亲热地称他为 Dick——译者注

用或作用后面完全的对称原理。当超弦理论用量子场论的语言来描述，当它的作用和对称性被发现了，那超弦理论就真的已经成熟了。

有效的作用

从作用开始，在原则上我们可以算出一个相关的量，我用 $\bar{S}$ 符号表示。理论物理学家可以给它一个“量子修正欧几里得化的作用”（quantum corrected Euclideanized action）这么一个名称。这个量是作用 S 修正型的平均值，这儿说的修正涉及时间变量特性的修改。我们可以把量 $\bar{S}$ 看成是“有效作用”（effective action），它对理论的解释起着很大的作用。首先，哈特尔和霍金可以用 $\bar{S}$ 表示他们提出的宇宙初始条件。其次，如果超弦理论真的有许多解，我们可以用量 $\bar{S}$ 寻求指导。由于某种原因，对一些不同解计算出的这个量，必须在这些解之间作出区分。

由经典物理学可以推论出，最小作用原理为详细阐述经典力学提供了一个美妙的方法，有些理论物理学家可以认定，符合物理学宗旨的正确解——表述真实宇宙性质——也必将是最有效作用 $\bar{S}$ 的最小值。这的确是挑出正确解的正确判据。

既然我们现在处理的是量子力学，那么，对宇宙来说，最后的结果也许根本没有单个的正确解，而只有一个概率的情形，所有真正的解只是可能的候选者；每个候选者都有自己的概率，概率变小时 $\bar{S}$ 的值就增大。事实上，用 $\bar{S}$ 表示的概率公式是一个衰减的指数函数，由图 10-1 的一条曲线来描述。具有 $\bar{S}$ 最小值的解，因此就具有表征宇宙的最高概率，而其他解也将具有某种机会。

解的分支树

应用到宇宙的特定解，将决定基本粒子系统的结构。事实上

还可以决定更多的事情。但应足够注意的是，它甚至可以决定空间的维数。

思考杂化超弦理论空间情形的一条思路是：理论从 1 维时间、9 维空间的空时开始；这样，不同的解对应于某些空间维的坍塌（collapse），留下的仅是可以观察到的维。如果应用 $\bar{S}$ 的概率解释，那么我们宇宙的三维空间性质，是超弦方程组一个特定解（例如，包含特定粒子集的特定费米子家族的数目）偶然出现的结果。

这样的一个概率情形，是解决超弦方程组许多外观解之谜最有趣的可能结果，假定它是一个正确的结果，那么我们会想到宇宙粗粒化历史可供选择的分枝树。每一个分枝是一个概率，从第一个分枝开始就选择了超弦方程组的一个特定解。

超弦理论的预言，无论它们是否依赖解的这样一个概率“选择”（choice），这些预言都必须与我们的 3 维空间的经验和基本粒子系统所有特性相比较。

如果杂化超弦理论在所有可以检验的情形下，都做出了正确的预言，那么，基本粒子的基本理论问题就大概被解决了，宇宙态的演化动力学也将被知道。但是，宇宙历史的描述依赖于初始条件，同时也依赖于宇宙历史树的所有分枝的偶然结果。

多 宇 宙

迄今为止，我们讨论的量子宇宙提出了宇宙可供选择的历史，但我们将宇宙视为一个单独的整体，它拥有所有各处的物质。但是，量子宇宙学还在不断改变，还充满一些很有趣的推测性的思想，因此量子宇宙学还存在许多问题；而且这些思想中的某些想法这样或那样地认为，宇宙不止一个而是多个（multiple universe）。既然宇宙（universe）一词的 uni-代表一，于是多和一就似乎是一个矛盾。也许用一个新词至少可以避开语义上引起的混乱。只要多宇宙的想法哪怕部分正确，这样做也是划算的。我

们可以用“multiverse”^{*}代表整个宇宙总体，在这总体中我们熟悉的宇宙只是其中一员。

多宇宙的引入没有多大意义，除非我们的宇宙基本上大都是自足（autonomous）的。有人提出，其他宇宙是在量子过程中虚创造、虚毁灭的“婴儿宇宙”（baby universe），正如量子场论里携带力的虚量子。霍金和其他一些人认为，婴儿宇宙的虚创造和虚毁灭改变了基本粒子理论计算的结果，但在本质上没有向我们宇宙历史分枝树的概念提出异议。

另外一种猜想的可能性是有无数宇宙存在，它们中的许多在尺寸上和我们的宇宙可以相比较，但和我们的宇宙接触很有限（如果有接触的话），这种接触也许在遥远的过去，或者可能在遥远的未来。有种猜想认为，多个的宇宙像是“多宙”（multiverse）中的气泡，这些气泡在很早以前就彼此分离开来，这以后各宇宙间有一段很长的时期彼此没有交往。如果这种多宇宙图像被证明有任何有效性，就会有人试图把不同气泡发生的事情与宇宙历史可能的分枝看成是同一回事情。这样，有一个异想天开的想法就出现了：粗粒历史之树的许多分枝实际上统统可以实现，但要在不同的气泡里。每种历史的概率在本质上就是一个统计的概率，特定的历史就发生在不同的“宇宙”中。

现在假定超弦理论的许多近似解的统计诠释是正确的，那么，就会有许多真实的解，它们与各种基本粒子模式和不同维数的空间发生联系。接下去，如果许多宇宙真的像气泡一样在一个多宙中存在，那么它们就可以用超弦理论不同的一些解来说明，这些解就会给出有效作用 $\bar{S}$ 值的衰减指数函数。

即使这样的理论推测被证明不是基本的，但是多个基本上独立的宇宙这个概念，仍然为量子宇宙学提供了一种好的思考方法。

^{*} Gell-Mann 造的词 multiverse 一时找不到合适的中文词译出，也许可以译为“多宙”？——译者注

“人择原理”

有些量子宇宙学家喜欢谈所谓的人择原理 (anthropic principle), 这个原理需要的是在宇宙中要有适合于人类生存的条件。这个原理的弱形式 (weak form) 仅指出: 只有特定的历史分枝可以让我们发现我们自己拥有特殊的条件, 让行星存在, 让生命包括人类的生命在这颗行星上繁荣发展。在这种说法中, 人择原理是十分明显的。

人择原理的强形式 (strong form) 则认为, 这个原理应该应用到基本粒子的动力学和宇宙的初始条件中去, 设法把那些基本定律塑造得可以产生人类。这种想法我认为太不合理, 不值得继续讨论。

但是, 我曾试图在一种人择原理的想法中找到某种解释, 这个人择原理既不失去价值又不是胡说。我能得到的最好结果如下所述。在基本方程不同的解 (如果事实上有多个精确的解) 和不同的历史分枝中, 某些解和某些历史在许多地方为复杂适应系统创造优越的条件, 使复杂适应系统可以作为 IGUS (信息收集和利用系统), 也可以作为量子力学分枝的观察者 (这些条件包括一种普遍的情形, 即适合于在有序和无序间起媒介作用)。这些解和分枝提出了一个很有趣的理论问题, 我建议把它称之为寻找一个 IGUS 的原理。这些条件的一个有利于 IGUS 的不重要的偶然性质是, 允许地球的存在、地球上生命和特别是人类的存在, 并出现在某些分枝上。

这种理论探索的一个应用, 是改善接收信号概率的计算, 这个信号是从遥远行星上智力复杂适应系统发出的。这在 SETI (search for extraterrestrial intelligence, 寻找地球外智慧) 计划中有过应用。有许多因素进入这种计算。其中之一就是因为灾难性的战争或工业技术的衰微会使我们文明社会完结, 那么这个技术文明可能持续多长的时间, 使我们能够和有兴趣发出信号。另一

个因素是一颗行星能够让复杂适应系统暂住（例如人类住在地球）的概率。这里有许多微妙的考虑可能会掺合进来，例如，莫洛惠兹（Harold Morowitz），他研究地球大气中的前生命时期的化学反应，这些反应为产生生命提供条件。他认为有一些非常严格的条件，才使这些反应得以发生。但另外一些专家，却并不像他那样确定。

为了取代有些可怕的“人择原理”，在给出基本粒子的基本理论和宇宙初始量子态后，我们在理论科学上似乎面临一系列有趣而又颇常见的问题，如复杂适应系统在不同历史分枝和不同时间地点演化所必需的条件。

初始条件的作用

我们已经几次谈到初始条件的作用，初始条件将有序输入早期宇宙，使后续的演化（首先是银河、恒星、行星等天体，而后是复杂适应系统）得以发生。我们还讨论过初始条件最有戏剧性的一个结果，即时间恒定地穿过宇宙向前流驶。下面我们更详细地揭示时间的流动。

第十五章 时间之箭

——向前和向后的时间

我们回忆一下陨星穿过大气和落到地面上的情形。有一个影片把整个事件的顺序倒转过来，我们立即知道时间被颠倒了。我们知道，时间单向性的基本原因是在 $10^{10} \sim 1.5 \times 10^{10}$ 年以前，宇宙处于一种非常特殊的状态。我们顺着时间朝简单的组态看去，则我们正在思考所谓的过去（past）；我们朝另一个方向看去，则我们正注视伸向远处的未来（future）。

初始态（即大爆炸的时刻）的致密性并没有充分描述出它的简单性。宇宙学家们认为有可能，甚至很可能，在未来遥远得几乎不可思议的时刻，宇宙将再次坍缩成非常小的结构。但是，即使这样，宇宙的结构与过去存在过的致密态十分不同。当再坍缩时，宇宙不会按膨胀的逆方向运动。宇宙膨胀和收缩彼此对称的观念，被霍金认为是他的“最大的错误”（greatest mistake）。

辐射和记录

时间向前和向后是不同的，这一点很容易用许多方法确认。例如，热的物体如恒星和银河向外辐射能量，辐射能量最熟悉的形式是辐射光子——如光、无线电波、 γ 射线，正是由它们才出现了光学天文学、无线电天文学和 γ 射线天文学等等。除了观测光子以外，中微子天文学正在崛起，而且将来有一天我们会有引力波天文学。这都是建立在探测向外辐射能流的基础上，其能流形式或为波，或为粒子。同样，当我们看见从火里或电灯泡里射出的光，我们的眼睛就正探测到辐射的光子流。如果时间逆转，以上情形中的能将向光源流进去。流出的能流可以携带信号；如果一颗恒星变为一颗超新星，它会突然非常亮那么一会儿，这个信息，以光速向外传送。

过去和未来的另一个差别是过去的事有记录，例如，在很久很久以前当辐射核衰变时会辐射出带电粒子，而这将在云母上留下踪迹。而未来的衰变则明显没有记录。过去和未来的不对称性是如此的明显，因此我们不必详细讨论它。

人类利用辐射送出的信号和记录，知道过去。我们甚至自己制造和保留记录，但是，信号和记录的存在一般完全不依赖于复杂适应系统（如利用它们的人类）的存在。

初始条件和因果关系

信号和记录的时间不对称性部分缘于物理学的因果关系，这是一个结果跟随它们的原因的原理。物理学的因果关系可以直接追溯到宇宙的一个简单的初始条件的存在。

可以得到宇宙可供选择的概率的物理量 D ，它的量子力学形式已经包含了过去和未来的不对称性。在对应于我们称之为过去的一端，它包含了对宇宙一个量子态的一个详细说明，我们称之

为初始条件。在另一端对应于遥远的未来，包含了对宇宙所有可能态的一个求和。这个求出的和，可以描述为一个与遥远未来的宇宙状态完全无关的条件。

如果初始条件也是完全无关中的一个，那就没有因果关系和没有那么多的历史。但情形恰好相反，初始条件是特殊和单独的一个。也许它正是哈特尔和霍金描述的那一个，它除了约束基本粒子系统的动力学定规以外，不需要任何信息。

如果未来的条件并不是完全无关的那一个，违背因果关系的事就会出现，一些用“过去”这个词无法解释（或至少极不可能解释）的事件也会出现，但是，却仍然需要（或近乎需要）对未来作详细描述的条件。当宇宙年龄增加时，这样的事件就越来越多。在这样一种情形下没有反映宿命论的证据，却有相当多的证据反对宿命论；因此，在没有任何可信的新论据的情形下，我们可以不考虑这种可能性，即未来的条件决不是无关的一种。但是，当把它归入到科学幻想和迷信时，我们仍然可以把未来的一个特殊的条件，看成是一个有趣的与事实矛盾的案例，与我们坚决相信是正确的因果情形形成鲜明对比。

从历史概率的基本量子力学公式出发，加上一个适当的初始条件，有可能推演出所有熟悉的因果关系，如信号和记录，它们从过去指向未来。所有的时间之箭对应于宇宙粗粒化历史的不同特性，而公式则显示出所有这些箭指向未来的倾向，而不是指向过去的任何地方。

熵和第二定律

在区分过去和未来的时间之箭中，有一个最著名的箭是称为熵（entropy）的量在一个封闭系统里有增加的趋向（至少不会增加），这个原理就是人们熟知的热力学第二定律。（按一位老年物理学家说的笑话，热力学第一定律说你不能获胜，而第二定律说你不能不输不赢。两个定律都挫败想发明永动机的人。）第一

定律只是说能量是守恒的：一个封闭系统的总能量总是一样。第二定律要求熵增加（或不变），这就有些难以理解，但其实熵在我们日常生活中是非常熟悉的一种概念。它是无序性的一种量度，谁不知道在一个封闭系统里无序性趋向于增加？

如果你整个下午坐在桌子旁把分币按年代分类，或把钉子按大小分类，后来什么东西把桌子弄翻了，这些不同的分币或钉子绝对会混在一起，不是吗？如果一个盒子被一个隔层分成两部分，左边的部分放入氧气，右边的部分放入等量的氮气。抽掉隔板后，两部分的气体将立即混到一起，不是吗？

对以上现象的解释是，分币或钉子混在一起的方式多于它们分开的方式；同样，氧气和氮气混合在一起的方式要多于它们分离的方式。这儿机会在起作用，在一个封闭系统里，有序向无序运动的可能性要大得多。

微观态和宏观态

这些可能性如何计算呢？在一个完全封闭的系统里，可精确地描述出大量的态，我们常称之为微观态（microstate）。在量子力学里，这就是系统可能的量子态。这些微观态根据粗粒化区分的不同性质，分类聚集到一块儿（有时可称之为宏观态）。在一给定宏观态中的微观态可以看成是彼此等价的，所以我们只关心微观态的数目。

还是以盒子为例。抽掉隔板后，两部分等量的氮气和氧气开始运动。现在，所有氮、氧气分子可能的微观态都聚集而形成这样的一些宏观态：盒子右边的氮气少于 10%，而右边的氧气少于 10%；含量各少于 10%~20%；20%~30%；等等。两边气体各占 40%~50%（或 50%~60%）的宏观态是最常见的微观态分布。这显然也是最无序的宏观态，在这种情形下气体在最大限度上混合在一起。

实际上，在一个封闭系统处于某一特定宏观态有不同的计数

方法，这与熵的专门定义有密切关系（玻尔兹曼常数是最方便的测量单位）。粗略地讲，一个给定宏观态的系统的熵是信息的总量，它应该详细描述处于这种宏观态中的一个微观态，这些微观态我们都看成完全相同。

“20 个问题的游戏”如果玩得很彻底，那么，除去野兽、蔬菜或者矿物是否为未知以外，我们还可以得到 20 比特的信息。20 比特相当于需要区别 1048676 个不同的信息，即有 2^{20} 种可能的选择方案。同样，3 比特为 8 种可能性，因为 $8 = 2^3$ ；4 比特为 16 种可能性；5 比特为 32 种可能性，等等。如果可能性在 16 和 32 之间，则比特数在 4 和 5 之间。

这样，如果宏观态中微观态的数目是 32，那么这个宏观系统的熵是 5 个单位；如果微观态数为 16，则熵是 4 个单位，等等。

熵就像是无知

熵和信息有紧密的关系。事实上，熵可以看作是一种无知的度量。当我们知道的只是一个系统处于一个给定的宏观态，这宏观态的熵测量有关微观系统无知的程度，其方法是对需要详细阐述附加信息的比特进行计数，而且如以前所说，宏观态中的所有微观态出现的概率都看成是同样的。

现在我们假定不处于一个确定的宏观态，而是以不同的概率占据不同的宏观态。那么，宏观态的熵则根据它们各自的概率求出平均值。另外，熵还有另外的功能，从信息的比特数，熵将引出固定宏观态。这样，熵可以认为是一个宏观态内对微观态无知的平均，加上对宏观态自身的无知。

详细的阐述相应于有序，而无知则相应于无序。热力学第二定律仅仅告诉我们，一个低熵（相当高的无序性）封闭系统（在其他情形相同时）在一个相当长的时间里，将会向较高的熵运动（即更加无序）。既然产生无序的方法多于有序，所以运动的趋势

是指向无序。

最终的解释：过去的有序性

有一个更深刻的问题是，为什么同样的论证不能用到时间逆转的方向？为什么一个系统的电影胶片倒转时，不能显示它向可能的无序性运动，而只能向有序运动？这个问题的最终解释在于几十亿年以前宇宙开始膨胀时简单的初始条件，这与量子力学概率公式中应用到遥远未来无关紧要的条件相反。它不仅是时间的因果之箭，使时间从过去指向未来，而且也包含着有序指向无序或“热力学”的时间之箭。宇宙的初始条件后来导致物质的引力凝缩，并形成年轻的银河系；当银河形成后，它内部又接着出现年轻的恒星和行星系统；然后恒星和行星又成熟、衰老。时间之箭从宇宙那儿传递从银河到恒星到行星的信息。在地球上，它传递的信息是从地球生命的起源到它进化到各种有生命物体的诞生和衰老。实际上，所有宇宙中有序的情况都是由过去的有序性和初始条件引起的。这就是为什么从有序向统计上更可能无序的转变，在任何地方都由过去走向未来，而不会有别的可能。

我们可以隐喻地把宇宙看成是一个旧式的手表，开始我们把发条上得紧紧的，然后发条逐渐松开、膨胀，表也因此越走越慢。发条松开的每一阶段，可以看成是一个新的整体形成，它从已有的结构那儿继承了一些特性，至少它还部分被缠绕着。我们可以从表发条的松弛情形来辨别每一近似单独整体的年龄。

银河、恒星和行星在它们逐渐衰老时有什么表现？我们来思考某些熟悉星体发生的情况。像太阳这类恒星的中心发生着热核反应，其温度高达几千万度，于是氢转变为氦，其转变时释放的能量最后在太阳表面产生太阳光（或恒星光）。最后，恒星用完了它的核材料，它的特征也就发生了改变，而且是以一种戏剧式的方式。如果恒星足够地重，它会突然变成一颗超新星（supernova），然后非常明亮地闪耀两个月后，坍缩为一个黑洞（black

hole)。显然，这样的一个过程，时间会是无向的吗!?

当人类建立一种有序模式时（例如把分币分类），并让它独自待在那儿，但可以让某种东西（例如一只狗），与它在一起，狗可以掀翻桌子。那么，这个封闭系统（桌上的分币加上笨拙的狗）将会变成无序的，因为无序的可能是如此之大。这种变化到时候总会出现的，因为人类按因果关系行事，这正如所有的事情都会在时间里向前运动一样。我们首先创造了有序的模式，然后让它与狗单独呆在一起。这样一种情形熵增加与恒星和银河系正在发生的事情并不那么很不相同。

如果有什么区别的话首先是有序模式的建立：对分币分类或桌子被打翻后重新分类。显然，分币分类后它的熵减小了，但这并不违背热力学第二定律，因为分币不是孤立系统。事实上，第二定律是说，将分币分类的人和人的周围环境合在一起，熵在增加，其增加的数量至少和分币熵减少的数量相等。这是怎么发生的呢？人在分类时他和周围环境熵增大的征兆是什么？

麦克斯韦妖

为了回答这些问题，我们讨论一个假想的小妖很有用处。这个小妖是麦克斯韦提出来，所以叫麦克斯韦妖（Maxwell's demon），它专门进行分类工作。麦克斯韦是发现电磁理论方程组的一位伟大科学家。他讨论一个最常见（或者说是最容易）的热力学第二定律的应用情形：让一个热物体和一个冷物体彼此挨在一起。假定一个盒子用一个可以抽出的隔板分成两部分，一边放置的是热气体，另一边则是冷的相同的气体。这个盒子是一个孤立的系统，且具有一定量的有序性，因为热气体的一边气体分子在统计上运动得快一些，而与它隔离在另一边的冷气体在统计上运动得慢一些。

首先我们假定这隔板是金属做成的，因此它可以传热。每个人都知道，热气体会逐渐变冷，而冷气体会逐渐变热，直到两部

分气体都达到相同的温度。显然，这正是第二定律要求的，因为较热和较冷气体分离的有序性消失了，因此熵增加了。

现在假定隔板不导热，那么冷热气体的隔离就可以保持下去，熵也就不会变化，这与第二定律不相矛盾。但是，如果有一个小妖它可以把运动快慢不同的分子分开，会出现什么情形？熵可以增加吗？

麦克斯韦妖守卫着隔板上一个活门，隔板仍然假定不导热。小妖准确观察着两边运动到活门边的分子，并判断它们的速率。热气体的分子运动的速率只是统计地快于冷气体，实际每种气体包含有运动速率很不相同的气体分子。脾气倔强的小妖巧妙地守在活门边上，只允许热气体中运动得最慢的分子，和冷气体中运动得最快的分子通过活门。这样，冷气体收纳了运动最慢的分子，变得更冷；而热气体接收了运动最快的分子，变得更热。这显然违背了热力学第二定律，因为小妖使热从冷气体流向热气体。接下去会怎么样？

因为这个定律只能用于一个封闭系统，因此我们要把小妖算进去。小妖的增加的熵，至少应该与盒子里气体减少的熵相等。这个增加了气体熵的小妖，到底像什么呢？

熵的一个新贡献

1929年，西拉德（Leo Szilard）在引入熵和信息的关系时，开始回答上面的问题。后来在第二次世界大战以后，香农为信息建立了清晰的数学概念，法国理论物理学家布里渊（Léon Brillouin）又进一步澄清了这一概念。在60年代，柯尔莫哥洛夫、蔡廷（Gregory Chaitin）和索洛莫洛夫引入了算法复杂性或算法信息量的概念。最后，兰道尔（Rolf Landauer）和IBM的贝纳特详细地找到了信息和算法信息量如何与人、小妖或装置相联系的办法，这后三者可以使一个物理系统的熵减少，而同时自己的熵增加相等或更多的量。

贝纳特证明，如果需要一个某一物理系统适当信息种类的设置，并把信息记录下来（例如记到纸上或计算机纸带上），那么这个设置就真地可以利用记录的信息，使热从一个冷物体流向一个热物体，但这只能发生在设置的记录纸或纸带是空白没写字的情形。由此，由热、冷物体组成的系统的熵就减小了，但代价是耗完了纸或纸带。在此之前，兰道尔曾经证明，擦掉记录，不留下任何复制件，就会使熵增加，增加的数量至少要补偿减少的量。最后，这设置必需填满记录的空间，因此，当记录被擦去以便重新记录时，热力学第二定律终究会被重新恢复。

我们上面只是提到，擦掉信息最终的拷贝时，熵必然增加到足以恢复第二定律。实际上擦掉任何拷贝都可能导致一个同样的熵事实上的增加，但在原则上只是最终的拷贝才行。因为如果至少有两个拷贝，那就有方法可以在某些条件下，利用其中的一个逆向地“反复制”（uncopy）另一个，而不会使熵有任何增加。

同时，在某种形式下，即使当记录存在和用来修正整个体系的熵定义的时期，有可能维持热力学第二定律。这可以加一个等同于适当的残存记录的算法信息量（AIC）的项。既然 AIC 仅仅依赖于描述信息的最短程序（*shortest program*），所以它的值不会因为记录有另外的拷贝而改变。所有上述情况在于每一个记录至少有一个范例存在。

用这种修正熵定义的必要性曾经被洛斯阿拉莫斯国家实验室和 SFI 的 W. 朱里克指出过。关于新的定义，我们可以按下面思路去思考：通常的熵是一种无知的量度，现在被记录了某些相应信息的 AIC 加以修正。这就是说，一种无知的折衷物代替了记录。当信息被获得和记录下来时，无知减少了，而与此同时记录中的信息增加了。当记录被擦掉时，记录中的信息减少了，但整个封闭系统情形的无知至少增加了相同的数量。

擦掉和撕碎

当小妖完成它的分类任务时，它必须知道每个单个分子的某种信息，在这样的条件下储存信息，它最后必然用完存储的空间。在这样的情况下信息要被擦掉，擦掉的行动增加了小妖和它周围的熵。但是完成擦掉的行为又意味着什么呢？

我们以铅笔为例，用普通的橡皮擦掉铅笔写下的符号。橡皮上掉下一些小末子，每一个小橡皮末子都载有一小部分铅笔的符号，这些小末子散到桌子上到处都是，甚至散落到地板上。这种有序的散落，实际上增加了熵。事实上，橡皮擦子的涂抹过程十分典型地使熵增加，大大地大于被擦掉的信息量，而且熵的产生大都有一个十分熟悉的特性（例如产生热）。为了证明这一点，我们一直忽略这种额外增加的熵，而集中于考虑由于载有信息的记录在被毁掉时微量增加的熵。

这关系到这种破坏能否可逆。如果这种过程可逆，即把橡皮末子所载的符号重新恢复原样，那么熵增加就与没发生涂擦行为发生了明确的联系——但是，不论涂擦发生与否，信息的复制仍然存在于碎末之中。

人们可能怀疑，认为这种重构的可能性在原则上不可能常常发生。这正是一个实际的问题，即能从这些小的橡皮碎末中恢复原来的信息吗？这种情形有一个戏剧性例子。1979年，“学生们”侵入和占领了德黑兰的美国大使馆，他们把大使馆雇员在最后时刻撕碎了的保密文件收集起来，然后耐心地把它们拼凑在一起，结果文件可以阅读，他们还把文件内容公布于众。虽然当今的撕碎机可以把文件作二维的撕碎，要想再把它们拼凑起来就更加困难，但在原则上不能说完全不可能。那么，我们怎么能说涂擦行为不可逆？或者说信息的散布或任何有序的破坏是不可逆的呢？为什么整个熵增加或有序向无序转化的想法，不是一种胡说？

没有粗粒化，熵就没有月

我们再回到氧气分子与氮气分子混合一起的例子。我们可以问：在什么意义上说气体混合就是无序性增加了？因为每一个氧和氮气分子，在每一瞬间总要呆在某一个地方呀！至少在经典近似上是这样的，因此，任何时刻的情形应该和前一任何时刻同样有序（假如知道每个分子的位置而不仅仅知道氧和氮气分子的分布）。

回答是熵像有效复杂性、AIC 和任何我们讨论过的量一样，与粗粒化有关，即与被描述系统详尽的程度有关。的确，一个系统如果所有的细节都考虑了的话，那么在数学上就可以认为熵不会增加，熵将保持不变。但事实上，一个分为许多部分的系统常常只用它的某些变量来描述，这些比较少的变量的有序性会随着时间的而散失到其他变量中去，于是后者也不能再看成是有序的了。这就是热力学第二定律的真正意义。

我们可以用微观态这个相关的词来思考粗粒化。一个系统我们开始用一个或几个微观态来描述，后来由于系统动力学演变，系统内的微观态通常都会彼此混合起来。后来，由数量最多的微观态组成的宏观态在混合态中逐渐处于优势地位。由于这两方面的原因，稍后的熵值将会大于熵的初始值。

我们可以把这里的粗粒化与量子力学的粗粒化相联系。我们以前讨论过一种最准经典领域(maximal quasiclassical domain)，它们由宇宙可供选择的粗粒化历史组成，这种历史像细粒历史一样，可能与被脱散和近经典的领域相一致。以前我们也提到过，量子力学中的准经典领域为此提供了宇宙粗粒化的理论上的最小值。在描述一单独客体(individual object)时，这个最小值对应于个体特性(individuality)的最大值。这个最小值在很多情形下，可以适用于粗粒化，并用以定义熵。当我们这样做时，那些可以用来定义熵的最精细的宏观态，就是那些在准经典领域遇到过的。

熵和算法复杂性

小妖在面对储存或擦掉的选择时，这种选择就好像面临任何正在创造有序的真实机器（或人或其他有机体）。如果需要存储信息，则机器减少了（传统定义的）熵，减少的熵的量最多和 AIC 储存的信息量相等。当信息被擦掉使存储空间空出来了，宇宙就会取回至少和原来丧失的一样多的熵。如果熵修正到可以包括存储信息的 AIC，那么热力学第二定律就在任何时候也不能有丝毫的违背。

AIC 提供的修正了的熵，可以称之为算法复杂性的熵，它与通常说的熵很不相同。虽然这个定义对整体的贡献微不足道，但它仍然十分重要，因为它量化了利用信息的可能性，从而胜过传统的第二定律，至少在记录被擦掉时是如此。

时间之箭和初始条件

时间的热力学之箭可以追溯到宇宙的初始条件和在量子力学公式里无关紧要的最初条件，这个公式描述宇宙脱散的粗粒化历史。与向外辐射有关的时间之箭和我称之为真实的宇宙的时间之箭，都可以有与上面相同的说法。（S. 霍金用宇宙的膨胀来定义他的宇宙的时间之箭，但按我的定义它不是一个真实的时间之箭。如果经历一段不可思议的长时期，宇宙收缩了，这时就会出现与时间之箭定义相矛盾的情形——正如霍金自己强调的那样，时效仍然在继续。）

与记录形成有关的时间之箭，最终也起源于宇宙简单的初始条件。最后，所谓的心理学时间之箭也起源于同样的初始条件。心理学时间之箭涉及到人类和所有其他复杂适应系统的有关时间向前流动的经验。记忆也是记录，如同其他记录一样，它们也遵循正向的因果关系。

更大复杂性的出现： 被冻结的偶然事件

随着时间的流逝，复杂性增加的机会似乎更多了。但我们知道，在一给定系统里，复杂性也可以减少，例如，一个社会由于气候、敌人或内部斗争等严酷的压力，会迫使自己退到一个较简单的社会模式。这样的社会甚至可以整个消失。（古老的玛雅社会的崩溃肯定涉及复杂性的减少，即使有许多玛雅人还活着。）但是，随着时间流逝，越来越高的社会复杂性会不断出现，类似的趋势还出现在生物进化中。虽然有些变化可以使复杂性减少，但趋势仍然是更高的复杂性。这是为什么？

我们讲过，有效的复杂性是一个系统规则性简明描述的长度。这其中的有些规律性可以溯源到统治宇宙的基本物理学定律；而另一些规律起源于这样一个事实：宇宙中某一给定部分在某一给定时期内，它的许多特性与另一些在某些过去了的事件中有共同起源的部分，彼此相关。这些特性有共同的性质，它们表现出共同的信息。例如，某一给定型号的汽车彼此相似，因为它们都出自同一设计，这些设计包含有许多出自不同选择的任意特性。这些“被冻结的偶然事件”（frozen accidents）可以通过各种各样的方式使它们自己感受到。当我们注视英王亨利八世银币时，我们不仅仅可以从银币上思考关于他的所有情形，还可以从宪章、大教堂里封存的文件和历史书上了解到，如果是他哥哥亚瑟而不是他登上王位，一切将会多么不同！所有这些资料都与被冻结的偶然事件有关。

现在我们可以阐明本书接近开始时所提出的一类相当深刻的问题了。如果我们发现一枚有亨利八世头像的银币，我们将如何利用物理学的基本定律推断出，还能找到另外一些这种银币吗？在岩石里发现一块化石，我们如何从基本定律推断出，这儿还可能有多更多类似的化石？答案是：只能利用宇宙的初始条件和基本

的动力学定律。然后，我们可以利用分枝的历史之树，从初始条件和由此引起的因果关系推断出，被发现的银币或化石的存在，说明过去发生了一系列事件使它们得以产生，这些事件也可能产生另外一些银币或者化石。没有宇宙的初始条件和物理学的动力学定律不可能使我们得到这样一个结论。

像我们前面讨论过的一样，被冻结的偶然事件也可以解释 4 个核苷酸 A、C、G 和 T 可以组成地球上所有有生命组织的 DNA。绕着遥远恒星旋转的行星也可能庇护复杂适应系统，它们与地球上的生命非常相似，但它们利用的是其他分子组成的原生物质。某些研究地球生命起源的理论家们认为，有几千种可能选择的 A、C、G 和 T 的集。（应该注意的是，其他一些理论家推测，我们熟识的核苷酸集可能是唯一可能的。）

对于被冻结的偶然事件，有一个更合适的候选者，那就是某些右旋分子对地球的生命化学起了重要的作用；而相应的左旋分子没发现有这些作用，而且在某些情形下完全没有地球上的生命形式。不难理解，为什么不同种类的右旋分子在生物化学中彼此可以相容，同样左旋分子也可彼此相容，但是，是什么决定这一种或那一种的选择呢？

有一些理论物理学家曾试图把这种左右不对称性与弱相互作用惊人的性质联系起来，弱相互作用在普通物质（由夸克和电子组成）中显示左旋性质，但在反物质（由反夸克和正电子组成）中却显示右旋性质。他们的努力还没有取得成果，但似乎有可能是生物化学的左右不对称性，是地球上所有还存活生命的祖先的一种被冻结了的特性，这种特性也可以用其他方式表现出来。

生物学的左右不对称性以一种惊人的方式说明，许多被冻结的偶然事件可以被看作是自发对称破缺的例子。可能有一个对称的可能性集（在这儿是右旋或左旋分子），但仅只有其中的一个在宇宙某一特定部分特定时间区间内实际上出现了。在基本粒子物理学中，自发对称破缺的典型例子被认为可以用到整个宇宙。（有可能还有其他自发对称破缺，甚至在基本粒子物理学中也有，

它们只能应用于宇宙中庞大的区域。如果真是这样，那么这个研究课题在某种程度上有了环境科学的特征了！)

树状分枝历史结构涉及到一种游戏，它与每一个分枝的机会有关。任何一个单个的粗粒化历史，它构成每一次游戏的一个特定结局。当每一种历史在时间中延续时，它记录下这些偶然结局的不断增加的数目。但是，有一些这样的偶然事件被冻结了，成为将来的规则（至少在宇宙中的某些部分）。因此，可能规则的数目随着时间的推移而不断增加，可能的复杂性同样如此。

这种作用并不严格限制在复杂适应系统里。宇宙物理结构的演化显示了同样的趋向：通过被冻结偶然事件的累加，出现了更多复杂的形式。随机涨落使早期宇宙产生了银河系和银河系的星团；每一种客体的存在，加上它们的独自特性，从它们诞生开始，就具有一种它存在于的宇宙的那一部分很重要的规律性。像恒星凝缩一样（包括聚星和恒星-行星系统），由这些银河系中的气体云，提供了对大地域重要的规则性。当宇宙的熵增加时，自组织可以产生局域有序性（local order），就像在一个旋转银河系的旋臂上和雪花对称形式的多样性一样。

一个正在进化的系统（无论是复杂的适应系统或非适应系统）在一给定时间内的复杂性，并不为它自身或后继者未来可能获得的复杂性提供复杂性层次的度量。为了满足这种量度的需要，我们在早先引入了潜在复杂性（potential complexity）的概念。为了定义这个概念，我们考虑系统未来历史的可能性，并将系统未来每段时间的有效复杂性对这些历史求平均，这些历史又根据它的概率来加权。（为此，时间的自然单位是系统随机变化的平均时间间隔。）由此所得到的潜在复杂性是未来的时间函数，它告诉我们有某种可能性使系统发展到某种更高的复杂状态。在我们稍前讨论的例子中，潜在复杂性将会把人类的产生与其他类人猿区分开来，即便他们的有效复杂性在当时并无许多差异。同样，一个行星的表面，在某一段时期内明显具有产生生命的概率，这行星的表面将与不大可能出现生命的行星不相同。

更大复杂性的出现会 永远继续下去吗？

经历一段非常长的时期后（即使用宇宙标准也很长），宇宙由于继续膨胀将变得和现在大不相同。恒星会死亡，黑洞在变得比现在的大得多之后，也将衰败，连质子（较重的核子）也会衰变。所有我们今天熟悉的结构全都消失。因此，规律性很可能越来越少，宇宙将多半只用随机性来描述。那时，熵将非常大，而算法信息量、有效复杂性将很低，深度也很低（参见图 5—1 和图 8—2）。

从现在到上述情形之间的时期里，如果上述图景是正确的，那么越来越复杂形式的出现将逐渐少下去，最终停止，然后又向较低的规律性倒退，这种后退恐怕势在必行。再继续下去，条件将不再有益于复杂适应系统的存在。当意义明确的个体变得越来越稀少时，个体甚至可能没落。

这个图景并不是没有争论的。需要有更多的理论研究来探索非常遥远的未来。虽然这种探索没有多少直接实践的价值，但它将有助于说明复杂性阶段（在这个阶段里我们发现了我们自己）的意义。并且，宇宙在经过一段非常长的时间后会走向再次坍塌，理论物理学家们正在研究这种现象，试图描述在宇宙收缩时熵继续增大会是一种什么情形，以及当宇宙处于这种演化阶段时复杂性的前景。

同时，在地球上，我们的行星和我们的太阳的性质曾经提供过被冻结的偶然事件，它们深刻地影响了地质学、气象学和其他“环境”科学的规则。实际上，它们为地球生物学提供了背景。地球、地球表面上气候以及前生命化学反应的演变，导致生命出现，这一切都说明被冻结的偶然事件的累积，在严格的时空区域就变成了规律性。特别是生物进化，引起了越来越高级的有效复杂性的产生。

1

第三篇

选择和适应

第十六章 生物进化及 其他领域中的选择的作用

包括生物进化在内的所有复杂适应系统的运作，都服从热力学第二定律。可是，一些反进化论者有时声称，生物进化与热力学第二定律相矛盾，因为越来越复杂生物形式的出现，表明随着时间的推移，有序性不断增加。这一断言当然是错误的，理由有如下几点：

首先，在诸如星系、恒星、行星和岩石之类的非适应系统的进化进程中，随着时间的推移形成了越来越复杂的形式，其原因我们在前面已经描述过，与熵增加无任何抵触之处。那些结构的发展变化全都服从第二定律，只是随着时间的推移，复杂性的分布越来越宽广，最大复杂性自然也增加了。

第二，热力学第二定律只适用于封闭系统（也就是完全自持的系统）。那些声称第二定律与生物进化之间存在矛盾的人所犯的一个致命性错误是，他们只注意到某些生物的发展变化，而没有考虑那些生物的外部环境。

生物系统之所以不能成为封闭系统，一个最显而易见的原因

在于，它们需要阳光作为直接或间接的能量来源。严格地说，如果我们不将太阳能的吸收也考虑进去，那热力学第二定律就不会成立。而且，能量不只是流进，也有流出，最后能量以辐射的形式散失到天空中（试想一下你的房子向寒冷的夜空所发出的热辐射）。能量流经一个系统会使其有序性增加。

而且，即使除了上述效应以外，还必须考虑地球环境的信息影响。为了说明将环境信息包括进来以后会出现什么情况，我们考虑这样一个高度简化的情形，即假定环境对系统的影响是稳定的，各种不同生物之间的相互作用也忽略不计。因此，给定的生物群体是在一个无重大变化的环境中进化。渐渐地，该群体将能更好地适应其环境，因为群体中的不同基因型彼此竞争，其中一些在产生可成活与繁殖的表型方面比另一些更成功。结果，环境与生物在信息上的一种差异逐渐地减小了。这个过程不禁使人想起这样一种物理现象，即把一个热物体与一个冷物体放到一起时，它们的温度将以符合第二定律的方式而达到热平衡。生物进化绝不与第二定律相抵触，它还为第二定律提供了一个有益的隐喻。适应过程本身就是一个群体在其环境中的一种成熟过程。

在世界各地的硫磺泉（以及海底深处构造板块之间的热泉喷出口）中，有一种称作圆齿蛇卷螺（*extremophile* 或 *crenarchaeota*）的原始生物在那里繁衍生存，而对于大多数生物来说，那种环境是极其恶劣的。在海底圆齿蛇卷螺的生命过程中，阳光只起着有限的作用，即只在产生氧化物的过程中起了作用。例如，阳光帮助维持浅水区域的其他生命形式，而那些生物所形成的有机物碎片不断掉落到圆齿蛇卷螺生活的区域。

强有力的间接证据表明，早在 30 多亿年以前，就有了至少在新陈代谢方面与现代圆齿蛇卷螺相似的生物。没人知道是否整个基本基因型也很相似，或是否基因组的某些部分经历了很大的漂变（*drift*），但选择压力在现实世界中产生的实际结果大致相同。不管是哪一种情况，我们都可以说，在高温、酸性、含硫的恶劣环境中生存这样一个极难解决的问题，在地球年轻时期得到

了解决。圆齿蛇卷螺达到了一种稳定状态，可以说达到了一种与其外部环境的进化平衡。

然而，外部环境大多数时候都是处于变化之中。大部分的自然情势都处于动态之中，从而使环境随着时间的推移发生重大的变化。例如，我们都知道，地球大气的成分就与生命的存在有着很大的关系。如今地球大气中大量的氧气，至少大部分可以归因于地表面上大量生长着的植物。

共进化物种

任何一个生物物种的外部环境中包括大量也在进化着的其他物种。每个生物的基因型，或作为每个物种之特征的基因群，可以被看作这样一种图式，它包含着对许多其他物种及对各种不同行为可能作出的反应的描述。因而，一个生态群落由大量物种组成，其中每个物种都在进化中“得知”了其他物种的习惯及怎样对付它们的模式。

某些情况下，使用这样一个理想化模型将非常有益，即考虑只有两个物种共同进化与应付对方潜在能力发展的情形。例如，在南美洲的森林中漫步时，我常常碰到这种树，它们为一种带刺的危险型蚂蚁提供营养物。反过来，那些蚂蚁驱走包括人类在内的、可能以多种不同方法伤害那些树的所有动物。就像我为避免意外碰到那种树面学会了识辨它一样，其他哺乳动物也学会了辨认它，而不去咬嚼它的树干或枝叶。这样的共生必定是经历了很长时期的共进化之后才得以产生的。

在同一个森林中，你可能还会碰到攻击-防御型竞争，它们也是通过两个物种彼此适应的进化过程而进行的。某种树可能通过进化获得这样一种能力，即能渗出一种有毒物质来驱除某种害虫。那种昆虫则反过来发展一种化解该毒物的方法，从而使之对自己不再造成威胁。那种树的进一步进化可能导致毒物成分的变化从而使之重新生效，这种过程不断进行下去。这种化学武器的

竞争可以导致一些在生物学上很有效的化学药剂的自然生产。其中某些药剂可能在药品、综合性害虫管理及其他领域对人类有很大的用处。

在没有经过简化的实际情形中，一个生态群落里的许多物种在随时间而逐渐（有时甚至是迅速）变化的无生物环境中共同进化。这种实际情况要比只有两个物种共生或竞争的理想模型复杂得多，恰如后者又远比只有一个物种在固定环境中进化的更加理想的情形复杂一样。在每种情形中，如果考虑整个系统的话，生物进化过程与热力学时间之箭是一致的；但只有在圆齿蛇卷螺那样最简单的情况下，进化才会导致一种信息稳态（informational steady state）。一般来说，就像没有生命的星系、恒星或行星等复杂物理化学系统的情形一样，进化过程是一种不断发生动力学变化的动态过程。一切系统都随着时间的推移而不断变得成熟，尽管是以一种迂回曲折的复杂的方式来进行的。

在一个生态群落中，通过进化而相互适应的过程是成熟起来的一个方面。生物进化是那种迂回曲折的过程的一部分，通过这种过程，潜在能力与实际能力之间的信息差异趋向于逐渐缩小。一旦有了复杂适应系统，就不仅有可能发现与利用机会，而且在实际中极可能进行。因为那是对系统产生作用的选择压力，推动该系统发展的方向。

中 断 平 衡

生物进化通常不像过去某些专家所想像的那样，以一种大致上均匀的速率发生，而是常常显示出“中断平衡”（punctuated equilibrium）现象，在很长一段时间内，物种（和更高级的种类或类群，比如属、科，等等）至少在表型方面相对来说维持不变，然后在某段短时间内发生比较急剧的变化。斯蒂芬·杰·古尔德（Stephen Jay Gould）在与同事尼尔斯·艾尔德里奇（Niles Eldredge）一起发表的专题文章中提出了这一观点，他后来还在一

些很受人欢迎的文章与书中花了大量的笔墨描述这种中断平衡。

是什么导致了那些平衡中断时比较急剧的变化呢？一般认为与此有关的机制可分为各种不同的类型。其中一种包括物理化学环境的改变，有时这是一种普遍流传的变化。在大约 6500 万年以前的白垩纪末期，至少有一个非常重大的物体同地球发生过碰撞，那次碰撞导致了尤卡坦（Yucatán）半岛边缘巨大的契克休鲁布（Chicxulub）坑。由碰撞引起的大气成分变化促使白垩纪毁灭，在那次毁灭中，大型恐龙与其他许多生命形式一起灭绝了。早在几亿年以前的寒武纪时期，产生了大量小的适于生存的生态环境，并被填充了新的生命形式（就像一项新的流行技术导致无数个就业机会一样）。新的生命形式创造更多新的小生态环境，如此往复下去。一些进化理论家试图将那种多样性的急剧扩张同大气中氧气的增加联系起来，但这一假说如今并没有被广泛地接受。

可能打断表观进化平衡的另一种剧变主要是生物学方面的。这时自然环境不必发生戏剧性的突然变化，而是基因组随时间逐渐地发生变化，但这种变化对表型的生存能力并无很大的影响。作为这种“漂变”过程的结果，一个物种的基因群可能向着一个不稳定情形发展，在这种不稳定的情形下，相当细微的基因变化可使表型发生根本性改变。可能在某个特定时期，生态群落中一定数量的物种都在趋近于那种不稳定状态，从而为那些最终导致一个或更多生物的重大表型发生突变，创造了成熟的时机。那些变化可能引发一系列连锁变迁，在这些变迁中，一些生物变得更加成功，而另一些生物则灭绝了。整个生态群落发生了变化，出现了新的小生态环境。进而，这种大激变使得邻近群落也发生变化，比如新的动物迁徙到那儿，并与已有的物种进行成功的竞争。一个暂时的表观平衡被打断了。

关 口 事 件

在物理化学环境未发生根本性变化的情况下，特别富有戏剧性的生物学事件，有时是中断平衡中决定性的原因。乔治·马森大学（George Mason University）和圣菲研究所的哈诺德·莫洛惠兹指出了那些开辟出可能的全新范围的突破性事件或关口事件（gateway events）的重大意义，这里所说的新范围有时涉及到高级组织或高等功能。哈诺德尤其强调哪些情况下只存在或几乎只存在这些关口事件，以及什么情形中还与生物化学变化有关。

首先，他概括了在生命史前时期的化学进化过程中发生的、导致地球生命产生的几种可能的化学关口。那些关口包括：

1. 导致利用阳光的能量代谢，并进而使一种能将某一部分物质（诸如后来被称为细胞的一部分物质）孤立起来的膜的形成成为可能的事件；

2. 为酮酸到氨基酸的变迁，进而到蛋白质产生提供催化剂的事件；

3. 导致称作二硝基杂环的分子形成，进而使 DNA 组分核苷酸形成，因而使基因组、生物图式或信息包的存在成为可能的事件。

在所有这些情形中，哈诺德强调了关口的狭窄性。通常只有少数特殊的化学反应才有可能开辟出新的范围；有时这种情形只与一个反应有关（这些反应的特殊性并不意味着它们未必确实——即使是一个唯一的反应也可能很容易地发生）。

在作为所有现在生物之祖先的生命形式产生之后，生物进化过程中依然发生类似的关口事件。许多那样的事件导致了新级别组织的产生。例子之一是真核生物的进化，这是一种其细胞中拥有真正的核（包含主要的遗传物质）及其他一些“细胞器”（organelles）——线粒体或叶绿体的生物。许多研究者认为，另外一些原始生物向单细胞真核生物的转变，是通过合并其他生物而

实现的，被合并的生物成为内共生体（意思是，它们在前者内部继续生存，从而与细胞形成共生），并进而进化成细胞器。

另一个例子是类动物单细胞真核生物（也许是真正动物的祖先）的进化。科学家认为，首先是类植物真核生物发生进化，它们每个都能进行光合作用，不但形成了细胞膜，而且在膜外形成了由纤维素组成的细胞壁。（膜的形成需要一种生物化学的突发变化，需要固醇的形成，后者与胆固醇及人类性激素有关。）然后，通过进一步的进化形成了这样的生物，它们只有细胞膜而没有细胞壁，因此也就不需要进行光合作用，而以摄取进行光合作用的植物为生。这种能力的出现是后来形成真正动物的关键。

另一个生物化学变革——将细胞联合起来的胶（glue）的出现，使得从单细胞生物向多细胞生物的进化成为可能，也许是通过集聚的方式进行的。

哈诺德·莫洛惠兹及其他一些人认为，至少在很多情况下，在经历了一系列早期变化之后，由一次或几次突变所引起的基因组中的微小变化，可以引发一起关口事件，从而引发作为打破进化平衡相对稳定性的主要事件的几场革命之一。进入由关口事件所开创的领域时，生物获得了新的有重大意义的规律性，使其复杂性上升到一个更高的层次。

如地震（或地球与太阳系中其他物体之间的碰撞）那样的自然破坏一样，这些事件既可视作具有重要意义的单个事件，也可视为某些分布尾端的一些非常事件，这个分布由一些规模大都小得多的事件构成。

通过集聚形成更高级的组织

在生态团体、经济或社会的进化过程中，复杂性增加的机会不断上升，如生物进化过程一样，并使得最大复杂性呈不断增加的趋势。最有意思的那些复杂性增加涉及到从低级组织向高级组织变迁的进化，这种进化主要是通过形成复合结构来实现的，比

如从单细胞生物到多细胞植物与动物的进化。

人类的一个家族或一个群体可以形成一个部落。一定数量的人可以通过合资成立一个商业公司来谋生。1291年，3个州联合成立了瑞士同盟国，之后不久又有第四个州加入，同盟国后来演变成了现代的瑞士联邦。13个北美殖民地组成了一个合众国，然后，通过1787年批准的一个宪法又变成为称作美国的联邦共和国。通过合作产生集合体可以非常有效。

虽然图式之间进行竞争是复杂适应系统的一个特征，但系统自身则可能在彼此相互作用的基础上陷入竞争与协作的混合状态之中。对复杂适应系统来说，共同组成一个同样也可具有复杂适应系统功能的集体，常常是有益的。例如当个人或公司在经济中运作时，为了促进全社团利益，而由一个政府来对它们进行调节。

图式的协作

即便是在众多的图式当中，伴随有协作的竞争有时不仅可能，而且非常有利。例如，在理论领域中，彼此竞争的概念并不总是互相排斥的，有时几个观点的综合比其中任何单个观点都更接近真理。然而一个特定理论观念的提倡者，常常能够通过声称他们的观点完全正确或全新，其他与之竞争的观点是错误的，应该抛弃，从而在学术生涯获得荣耀或其他回报。在一些领域及某些情况下，这种方式可能行得通。可是大多数情况下这是倾向于妨碍达到预期目的的。

例如，在考古学及人类学的某些部分，人们对文化特征的传播性与独立发明性之间存在着激烈的争议。可是，两者似乎明显地同时存在。零在印度的发明（并通过阿尔-花拉子模的工作传入欧洲）看来极有可能与中美洲零的发明（比如，古典玛雅人所使用的零）没有联系。如果曾经存在过某种方式的接触，那么为什么在前哥伦布时期的新大陆几乎完全没有轮子（据我所知，它

只是在墨西哥生产的少数玩具上出现过)，而在旧大陆却已存在了相当长的时间呢？这怎么解释呢？弓箭看来是从北美传入中美的，而许多其他文化成就，比如玉蜀黍的培育，是以相反的方向传播的。面对这些，学者们怎么还能彼此指责为传播主义者或反传播主义者呢？

一些文化人类学家喜欢为部落习俗提出生态和经济方面的理论解释，这些解释初看起来可能显得很主观或是非理性的。他们所做的实际上是一件很有价值的工作，但有时他们接着又嘲笑这样一种观点，即非理性与主观选择在信仰系统和社会行为模式方面起着重要的作用。这无疑走得太远，一个合理的观点应将生态和经济决定论与部落图式的不可预测性行为协调起来。例如，某个特殊的禁食令，比如说禁止猎食一种鹿（okapi），对于一个人群的营养需要及猎鹿所需要的人力，与在周围森林的生态背景中繁殖其他食物相比而言可能是合理的。然而，这种限制也可能是由于早先将这种鹿当作部落图腾的原因，或者两种理由都存在。那么，坚持说其中一个观点永远正确难道是明智之举吗？

圣菲研究所的一个长处在于，它营造了这样一种学术气氛，学者们和科学家们都能为同伴的观点所吸引，并致力于将那些观点调和起来，而且只要有可能，就想方设法从中创立一种有益的综合理论。这种和谐性甚至胜过在他们自己研究所里的情形。有一次，好几位来自同一个大学同一个系的教授参加了研究所的讨论会，结果他们发现，在圣菲他们能够积极地讨论一些在自己学校时只能引起争执的问题。

在生物进化中，与图式间协作联系最密切的可能是有性生殖的遗传学，其中亲本生物的基因型在子代中被杂合起来。我们后面将要讨论有性生殖的问题，不过首先还是让我们先进一步探讨一下向较大复杂性发展的趋势问题。

存在一个指向较大复杂性的驱动力吗？

我们已经看到，生物进化的动力学可能相当复杂。然而它常常被人们描绘得非常简单。更复杂形式的出现有时被误以为是通向某种完善形式的稳定进展，而后者可能被认为是特创的物种，或甚至是特创的种类或种属。幸而，那种态度正日趋衰微，如今更多可能的是将进化看作一个过程，而非将它视作是一种目的论的、通向某个终点的方式。

然而，即便是现在，而且即便是在一些生物学家之中，关于生物进化内部固有一个指向复杂性的“驱动力”的观点，在一定程度上仍然存在。我们已经看到，实际上所发生的事情往往更微妙一些。进化一步一步地进行，在每一步中，复杂性要么增加，要么减小，但它对全部现有生物的效果是其最大复杂性有随时间增大的趋势。一个类似的过程会在一个不断变富的社团中发生，即，尽管收入的范围不断变宽，从而最大的家庭收入趋向于不断增加，但每一单个的家庭可能感到他们的收入或增加或减少，或维持不变。

如果我们忽略增加的复杂性给物种带来的任何好处，那么我们可以将不断变化的复杂性的分布，看作是一种传播。这种传播可通过一条线上的“随机游动”来例示。许多跳蚤从同一个点开始，不断地随机跳跃，每次跳过同样的距离，要么跳离初始点，要么跳向初始点（当然开始时都是跳离初始点）。在此后的任何时刻，将有一个或更多的跳蚤跳离起始点的距离最远。跳离距离最大的跳蚤可能不断发生变化，究竟某个时刻是哪些跳蚤距离最远，自然取决于哪些跳离初始点的净步数恰巧最多。随着时间的推移，任何一个跳蚤跳离初始点的最大距离趋向于不断增加。如图 16—1 所示，随着跳蚤向越来越大的距离扩散（diffusion），跳蚤距初始点的距离分布也展开来。

朝向更高的最大有效复杂性的运动，尤其是对星系那样的非

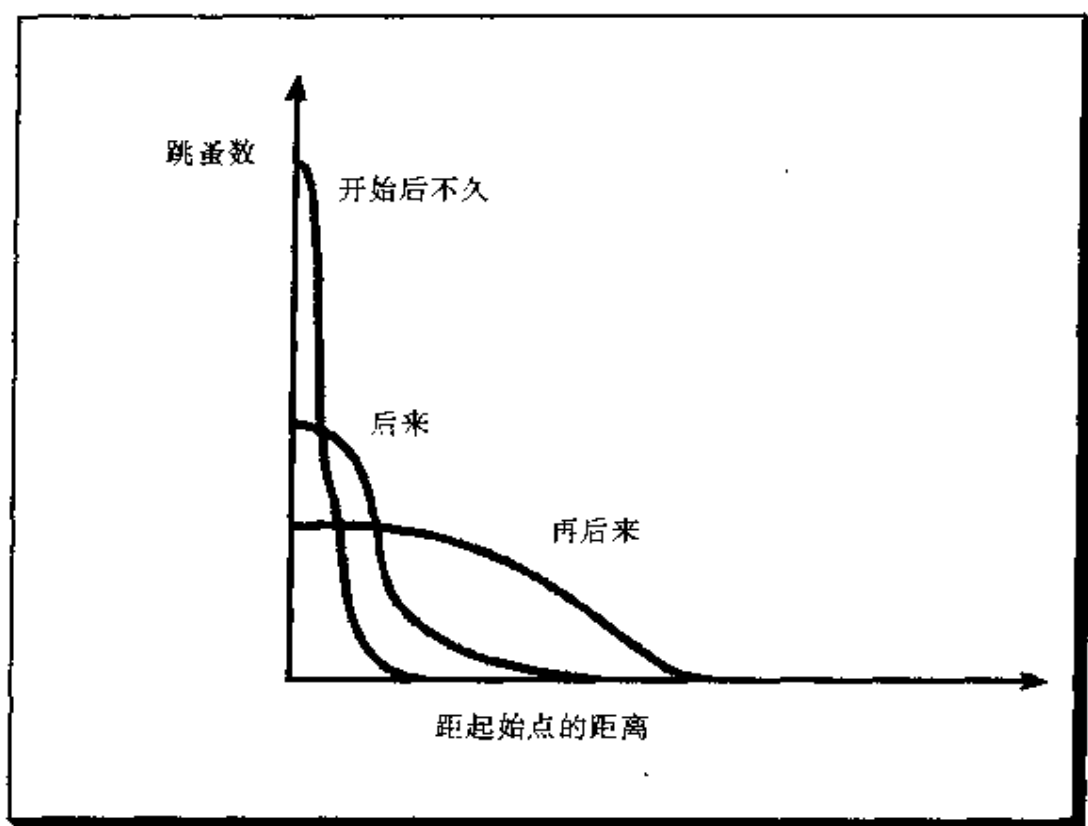


图 16-1 随机游动中不断变化的距离分布

适应系统来说，可能是通过一种与扩散相似的方式来进行的。但在诸如生物进化的复杂适应系统中，常常是由于某些情况下选择压力对较高复杂性有利的的原因。这种情形下，作为随时间而变化的复杂性分布，将在形状上不同于随机游动的分布图。虽然仍没有理由相信存在一种稳定的驱动力，使生物朝更复杂的方向进展，但对较大复杂性有利的选择压力却常常是强大的。描述那些对复杂性极其有利的系统与环境，对我们来说是一个重要的智力挑战。

生物进化过程中的关口事件通常使复杂性大大增加，并创造出具有重要意义的有利条件。决定性关口的打开导致小生态环境爆发式地形成，而小生态环境的填充可能看起来很像是由一种指向更大复杂性的驱动力所致。

既然人类是地球生物进化史上最复杂的生物，那么，我们一些

人将整个进化过程看作是为有智力的人的出现铺路也就可以理解了。即使这个观点只是愚蠢的人类中心主义,但其中至少有一点还是说得过去的,即生物进化的作用在我们这里中止了,或至少现在暂时停滞了。我们对生物圈的影响如此深远,而且我们改变生命(不仅仅是通过像驯狗这种古老而缓慢的方式,而且以遗传工程那样的现代方法来进行)的能力不久之后将非常之巨大,以至于地球上未来的生命确实实将在很大程度上依赖于我们这个种所作出的决定性选择。除非发生大规模抵制技术(由于有非常庞大的人口需要生存而难以实现),或大多数人类种族的自我毁灭(伴以向野蛮状态的返祖),否则,不管是好事还是坏事,在可预见的将来,自然生物进化的作用将让位于人类文化及它的进化。

生态群落的多样性

不幸的是,人类的知识、理解力及创造力需要经历相当长的时间,才能赶得上——如果它们能赶上的话——历经数十亿年生物进化而获得的“聪明”。不光是单个生物进化出它们自己独特的、错综复杂的模式和生活方式,而且,生态群落中大量物种的相互作用在长时期内也经历了微妙的相互调节。

各种不同的群落各由一组特定物种组成,这些物种随地球区域的不同而不同,在同一区域里,又随自然环境的不同而不同。在陆地上,生态群落的特征随诸如纬度、降雨及其在一年中的分布、温度及其变化模式等等之类因素的不同而不同。物种分布与地域差别有关,后者在很多情况下受数百万年中大陆的漂移运动与古代迁徙及疏散等偶然事件的影响。

因而,即便都是在热带,不同的森林之间仍存在很大的差别。并非所有热带森林都像过去某些送给新闻机构发表的消息所描绘的那样,都是低地雨林。有一些是低地干旱森林,另有一些是山地雨林,等等。而且,你还可以区分出数百种不同的雨林,它们包含着大为不同的动、植物。例如在巴西,既有树种随区域

的不同而不同的广袤的亚马逊低地雨林，也有大不相同的、现已缩减为原来很小一部分的大西洋雨林。在它的南端，大西洋森林融合到巴拉圭的阿尔托帕拉那（Alto Paraná）森林和阿根廷米西奥内斯（Misiones）省的热带森林之中。亚马逊森林日趋严重的毁坏现象已经引起了广泛的关注，尽管它的大部分仍然存在（不幸的是它有时处于一种退化状态，只是在空中看来不易察觉），不过保护大西洋森林的剩余部分更为紧迫。

同样，不同的沙漠也彼此有别。在纳米比亚的纳米比沙漠中，大部分的动植物都不同于非洲另一端撒哈拉沙漠中的动植物，也不同于马达加斯加南部灌丛沙漠中的动植物。

加利福尼亚南部的莫哈维（Mojave）沙漠和科罗拉多沙漠彼此大为不同，而它们与其他如以色列的内盖夫（Negev）沙漠又都没有很多共同的物种（但是要注意，著名的以色列仙人掌萨巴拉是从墨西哥和加利福尼亚引进的）。到科罗拉多沙漠和内盖夫沙漠游览时，粗一看来，它们在植物外观方面有着许多相似之处，但那种相似性大都不能归因于物种之间的亲近关系，而应归因于进化趋同作用，这种作用是相似的选择压力运作的结果。同样，东非干旱高原的大戟属植物类似于新大陆的仙人掌，也只是由于它们适应于相似的气候；它们属于不同的科别。由于进化，对于一个生物群落在一组给定条件下生活的问题，在地球的不同区域产生了许多不同但很相似的解答。

面对自然群落如此广博的多样性，人类拥有足够的集体智慧来作出正确的策略选择吗？在作为一个物种进化到足够成熟以至能自如地应用之前，我们能够获得实现巨大变化的能力吗？

生物学的适应性概念

由许多复杂个体所组成的生态群落，其中那些个体各属于大量不同物种，并都发展出可以描述和预言彼此的行为的图式，这种群落是一些不可能达到或非常接近于一个最终稳定态的系统。

每个物种都是在由许多其他物种组成的、不断变化的集体中进化。这个情况显然与海底圆齿蛇卷螺的情形有很大的不同，后者是在一个相对稳定的物理化学环境中进化，它们与其他生物的相互作用主要是通过从水上落下的有机物质而实现的。

即便是像圆齿蛇卷螺那样相当简单与近于自持的系统，通常也不能定出一个有严格数值属性定义的“适应性”，当然也不是一个随进化而不断增长，直到一个稳定状态为止的系统。即便在这样一种简单情况下，将主要精力直接集中于选择压力也要安全得多，这种选择压力对几个表型特征中的一个有利，从而影响不同基因型的竞争。那些选择压力也许不能用一个有明确定义的被称为适应性的量来表示。它们可能需要一个更加复杂的描述，即便是在单个物种适应固定环境的理想情形下，也是如此。那么，给一个处于不断变化的环境之中的生物的适应性设定一个真正有意义的测量方法，也是不可能的；尤其是当它属于一个由有着密切相互作用并适应彼此特性的众多生物组成的生态群落时，就更不可能了。

当然，用适应性来对生物进化进行简单讨论常常是很有益处的。适应性作为生物学概念的基础观点是，基因从一代到下一代的传播依赖于生物幸存到能够繁殖的阶段，而且其后代也有一定数量的成员能存活到具有繁殖能力。不同的存活与繁殖率往往可以用适应性来粗略地描述。根据适应性的定义，具有较高适应性的生物，通常比具有较低适应性的生物能更加成功地将基因传递下去。在一种极端情况下，遗传模式使生物不能繁殖，那么这种生物就只有很低的适应性，并趋向于绝种。

适 应 性 景 观

当我们引入“适应性景观”(fitness landscapes)这样一个粗略概念时，一个通常的困难便呈现了出来。假定将不同的基因型在一个二维平面(代表描述实际上可能存在的基因型的多维数学

空间)上表示出来。适应性或不适应性用高度来表示,随着基因型的变化,适应性的变化形成了一个二维平面,在三维空间则有大量的小山与山谷。生物学家习惯上用较高的高度表示较大的适应性,所以山顶对应于极大的适应性,谷底对应于极小的适应性;但是,我将使用在其他许多领域常用的而与上述表示法相反的方式,将整个图颠倒过来。这样一来,适应性随深度增加而变大,凹陷处的最底部表示极大适应性,如图 16—2 所示。

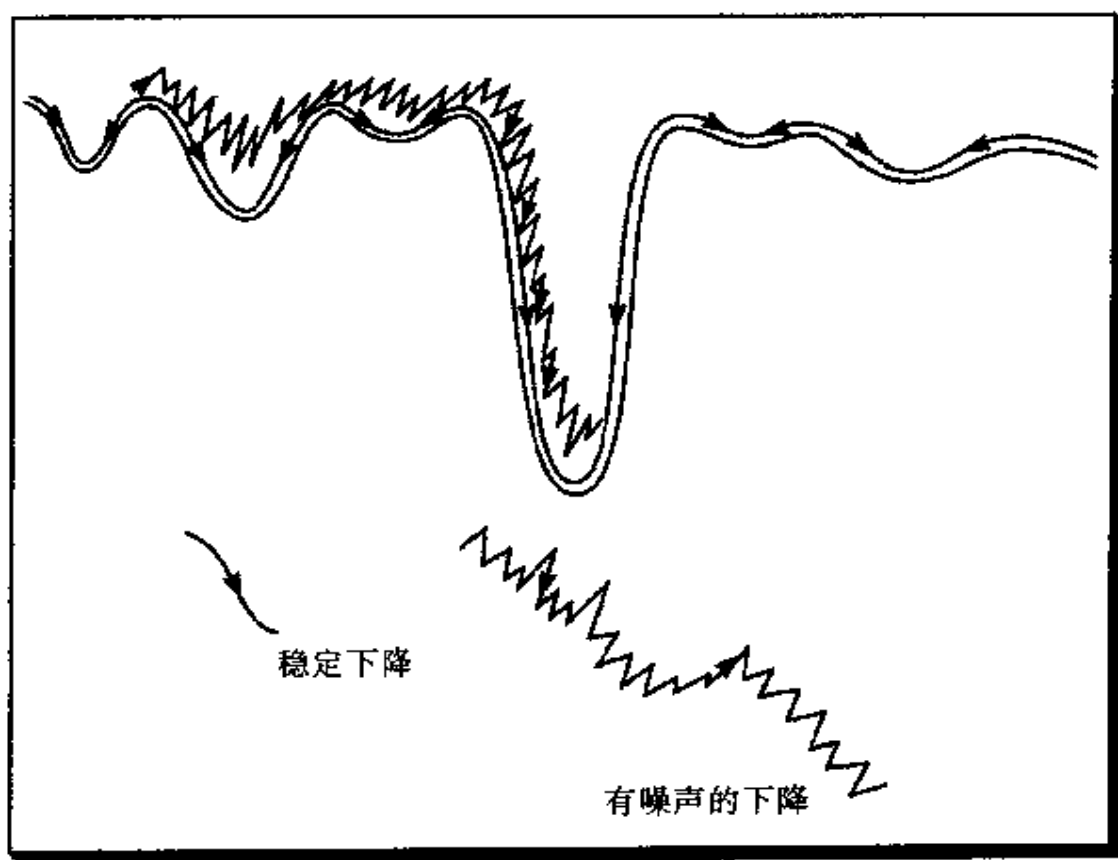


图 16—2

一个适应性景观,其中较大的深度对应于较大的适应性

景观非常复杂,上面有许多深度大为不同的坑(“当地适应性最大处”)。如果进化的结果总是稳定地向山下移动——适应性不断提高——那么,基因型有可能被阻滞在一个浅坑的底部,而没有机会到达附近对应于更大适应性的深洞之中。无论如何,基因型必须以一种比只是向谷底下滑更复杂的方式变化。例如,它

如果能够以一种随机的方式在附近轻微地上下晃动，那么这样一种晃动将使它获得逃离浅洞而发现附近更深坑洞的机会。但是，不能有太多这样的晃动，否则整个过程将停止运行。我们已在前面很多地方分析到，复杂适应系统在有序与无序之间的一种中间条件下运作得最好。

相容适应性

使用适应性概念时，进一步的困难来自于进行有性生殖的较高级生物。这种生物只将自身一半的基因传递给一个后代，后者的另一半基因来自于亲代的另一方。后代不是纯系，而只是近亲而已。而且生物还有其他的亲属，它们之中幸存下来的也能对与自身基因相似的基因传递有所贡献。因而生物学家提出一个称为“相容适应性”（inclusive fitness）的概念，它将一个生物的亲属存活至繁殖的程度包括了进来，并根据亲缘关系的远近而有所偏重。（当然，相容适应性也包括生物自身的存活问题。）进化应该具有这样一种普遍的倾向，即（主要通过那些能促进生物及其近亲存活的遗传行为模式）显示出高相容适应性的基因型占有有利地位。这种倾向称为“亲选”，它与这样一种进化图景符合得很好，即生物只是基因借以传播自身而“使用”的精巧装置。上述观点已被通俗化为“利己基因”这样一个名词。

利己基因与“真正利己的基因”

利己基因现象的一个极端形式可能存在于被称作“分离异常”（segregation distortion）的现象中。如社会生物学家罗伯特·特里弗斯（Robert Trivers）所描述的，分离异常可能是由于“真正利己基因”的运作。他说的意思是，一个基因直接发生作用，而不通过形成生物的方式发生作用，在与其他基因模式的竞争中获得了成功。存在于雄性动物中的这样一个基因可能致使负荷它

的精子胜过，或甚至摧毁其他的精子，从而在使雌性动物的卵受精的竞争中更易于获胜。但是，一个真正利己的基因不必赋予所形成生物以任何有利条件，甚至可能有一定的害处。

除这些可能的非凡例外情形之外，选择压力是通过由精子与卵所产生的生物而间接地施加的。这与复杂适应系统观念更加相合，在这种系统中图式（这个情况下是基因组）是在现实世界中（这里是以表型的方式）而非直接地接受检验。

个体与相容适应性

同时涉及普通的个体适应性与相容适应性的一个有趣情形是某些鸟类的所谓利他行为。墨西哥鸦或灰胸鸦生活在墨西哥北部、亚利桑那东南部及新墨西哥西南部的干旱栖息地。几年前鸟类学家观察到，这种鸟类的一个鸟巢常常有许多鸦在照管，而不是只有产卵的一对。那些鸦在那儿干什么呢？它们真是在施行一种利他行为吗？杰拉姆·布朗（Jerram Brown）的研究表明，大多数情况下，协助者自身就是那对筑巢鸦的后代；它们是在帮助抚养它们自己的同胞。这种行为似乎是通过相容适应性而向社会行为进化的一个显著例子。进化对这样一种行为模式很有利，即年轻的鸦延迟它们自己的繁殖，去帮助喂养与保护比它们更年幼的同胞弟妹，从而有利于与它们自身基因非常相近的基因传播。

最近，通过约翰·费兹帕特瑞克（John Fitzpatrick）和格纳恩·伍尔芬登（Glen Woolfenden）对另一种相近鸦的研究，这幅图景变得更加复杂。这种鸦叫做佛罗里达丛鸦，它生活在佛罗里达南部正在迅速消失的干旱橡树林栖息地。直到现在，那种鸦通常还被认为是丛林鸦众多亚种之中的一种，后者是美国西南部一种很普通的鸦，但费兹帕特瑞克和伍尔芬登现在提出，根据它们的外观、啼叫声、行为与遗传学等，它们应被看作另一个种别。其中的行为包括在巢边帮助抚养幼鸦，如同上述灰胸鸦的情形。这里，协助者同样也倾向于是两位筑巢者的后代，但不同的是，

佛罗里达的研究者所进行的观察表明，那些协助者不仅是为了照顾它们的同胞，而且还为它们自己的利益。橡树林中的筑巢区域非常大（大约 30 英亩），它们强有力的防卫使其他动物难以靠近。协助者们是处于一种对继承它们生活所在的全部或部分领域最有利的状态。至少在佛罗里达，似乎是普通个体的适应性在“利他”丛林鸦行为中起着重要的作用。

我引入丛林鸦的故事并非为了卷入鸟类学家之中的争议，而只是想说明一下整个适应性概念的微妙性，不管它是不是相容的。即使当适应性是一个有用概念时，它也仍然是循环式的。进化对最适应者的存活有利，而最适应者是那些幸存或其近亲幸存的生物。

性别的适应性

有性生殖现象向选择压力与适应性理论提出了一些特殊的挑战。像无数其他生物一样，高级动物倾向于有性生殖。但在很多情况下，同样的动物也能进行单性生殖。在这种单性生殖中，雌性生物生产出遗传物质完全相同的雌性后代，除非有某些可能的突变，不需要有雄性起作用。即便是复杂如青蛙这样的动物的卵，也可通过针刺这样的方法得到蝌蚪。在少数情况下，比如栖息在墨西哥和美国西南部的鞭尾蜥蜴，整个脊椎动物物种看来都只是通过单性生殖的方式来进行繁殖，根本没有雄性成员。那么性别是怎么回事呢？有性生殖所带来的巨大好处是什么呢？为什么通常会选择有性生殖而非单性生殖呢？雄性成员在实际中究竟有什么作用？

有性生殖使后代的基因型变得丰富多彩。大致说来，染色体（每条包含一串基因）是成对出现的，同对的两条染色体有一定的对应关系，每一生物个体从父方与母方各承继一条。究竟哪个来自于父方或母方则主要是个偶然性的问题（对完全相同的双胞胎来说，这些不同的随机选择产生出了同样的结果）。有多对染

色体的生物之后代通常有这样一个染色体组，它由分别来自于父方与母方染色体对的不同染色体所组成。

而且，有性生殖引入了一个关于染色体变化但不同于普通突变的全新机制。如图 16—3 所示，在称作“交换”（crossing-over）的过程中，分别来自于父方与母方的两条对应的染色体在精子或卵形成时可能发生部分变换。比如设交换发生在母方产生

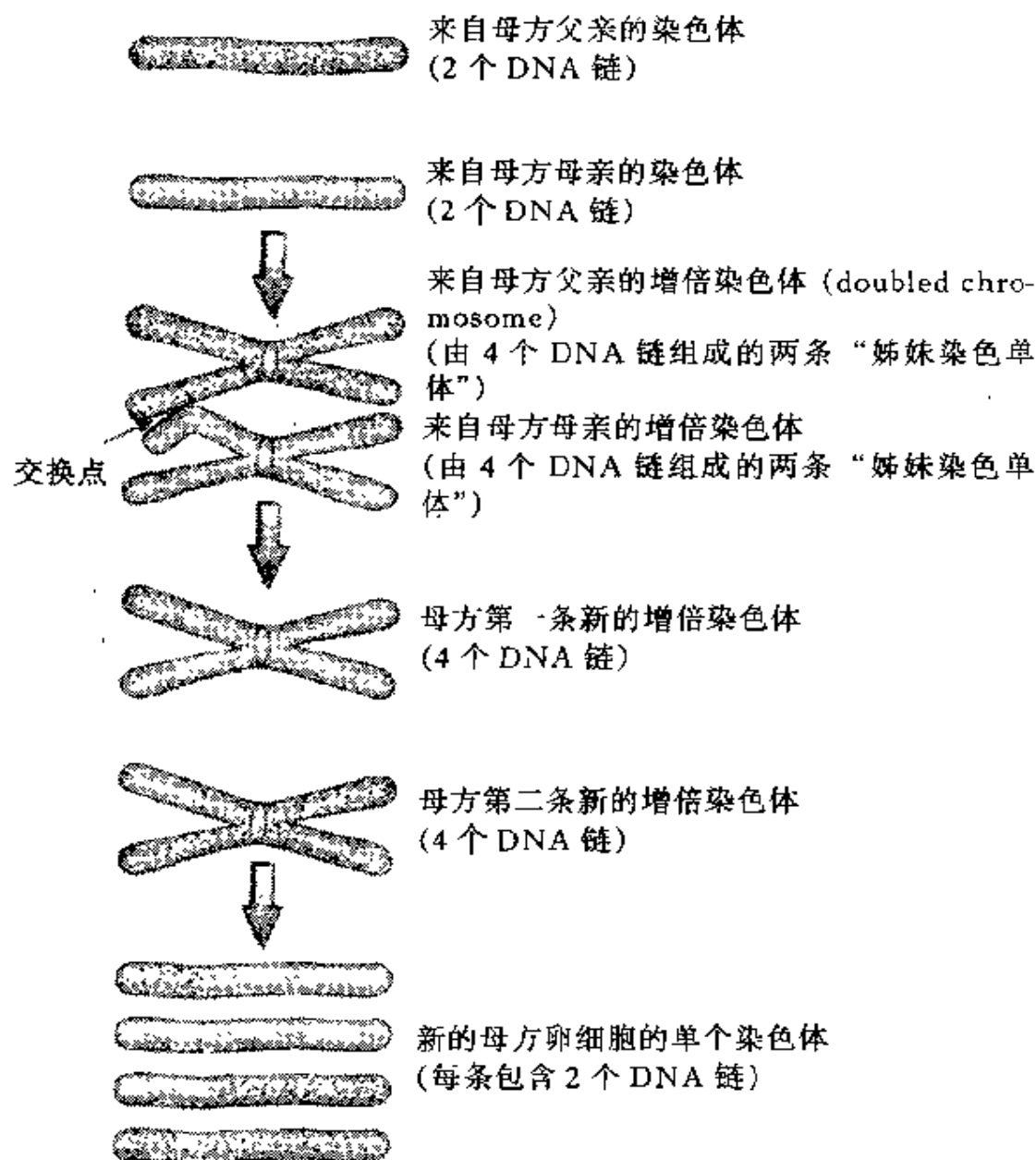


图 16—3 有性生殖中的染色体交换

卵的过程中。一个卵获得了一条混合型染色体，其中一部分来源于母方的父亲，其余源自母方的母亲，而另一个卵可能得到了这样一条染色体，它由外祖父与外祖母的染色体中（除去上一个卵的染色体组分）所剩下的部分组成。

进化理论家威廉·哈密顿（William Hamilton），现已是牛津大学的教授，他提出了一个关于有性生殖之价值的简单解释。大致说来，他的观点是，一个物种的天敌，特别是对其有害的寄生物，对有性生殖产生的有广泛特性的群体的适应，要比适应由单性生殖产生的比较单一的群体更困难。由于来自父方和母方的染色体的联合及交换过程使后代呈现出各种各样的新型组合，迫使寄生物去应付大量的寄主与它们所呈现出的各种不同的身体化学及习惯等。结果，敌人面临着重重困难而寄主更安全了。

理论指出，不进行有性生殖的物种应有其他对付寄生物的机制，特别是在那些数千万年里都没有性别的低等动物群中。蛭形轮虫就是这样一种群体。它们是一种轮生微生物，栖息在像青苔丛那样大部分时间都很潮湿，但根据天气的变化每隔几个星期或几个月就要干涸一次的地方。哈密顿的一个学生欧里维亚·贾德森（Olivia Judson）正在研究那些轮虫，并试图建立有关它们如何对付寄生虫的理论。她提出，它们在周围环境干涸的时候变干并被吹走的习性，为自身抵御寄生虫提供了足够的保护，从而使之无需有性生殖所起的作用。

无论如何，有性生殖的好处必然大大超过它所带来的害处，这害处是打断了存在很长时间因而具备了复制能力的父母与祖父母的成功基因型。不过，这些有利性不断增加是对整个种群而言的，尽管许多进化论生物学家坚持认为选择压力只对个体起作用，或许那不必是一个严格的规则。

在圣菲研究所最近的一次会议上，任教于萨西克斯（Sussex）大学的约翰·梅纳德·史密斯（John Maynard Smith）就这一问题发表了评论；接着主持讨论会的布里安·亚瑟（Brian Arthur）追忆了他和史密斯首次相遇的情景。他们两人都有工程

学的背景知识。梅纳德·史密斯原是一个飞行器设计师，后来改而从事进化论生物学，在这一领域，他已作出一些突出的贡献。在贝尔发斯特（Belfast）长大的布里安先是从事军事研究，后来进行经济学研究，成为斯坦福大学的教授与圣菲研究所经济计划的创始人。他们在瑞典的一次科学会议上首次相遇，会议上，梅纳德·史密斯在演讲过程中谈到，虽然性别对整个群体有着明显的好处，但它对个体所起的作用还不太清楚。布里安在听众席上大叫，“多么英国化的一个性别观！”梅纳德·史密斯立即回敬道：“从口音听得出你是爱尔兰人。好了，我们英国至少还有性别。”

生物学中的死亡、繁殖与种群

虽然性别在生物学中并不普遍，可死亡却是相当普遍的事情。生物的死亡是热力学第二定律最生动的体现之一。因此，在某种意义上说，死亡是所有复杂适应系统所共有的。可是，它在生物进化方面很有意义，因为死亡与繁殖之间的相互作用是适应过程的最前线。不同基因群之间的竞争在很大程度上可以翻译成相应生物种群大小的竞争。在生物进化中适应性有明确定义的范围，它确实与种群大小有关。

纵观各种不同类型的复杂适应系统，不难看出存在这样一些系统，在其中死亡、繁殖及种群不像生物学上那么重要。例如，考虑一个正陷入深思、解决问题的人。这种情况下图式是观点而非基因型，同死亡相类比的事物是遗忘。谁也不能否认遗忘的普遍存在或重要意义，但它与生物学中死亡所起的作用很不相同。如果不需要遗忘，不需要“删去录音”，那么思考的特性将不会发生重大的变化。记录一个观点固然有用，而且是对遗忘的抵制，但是相同或近似相同的备忘录数量，并不能使一种思想的适应性，具有生物学中与种群相关联的适应性那种特征。

随着思想在社会（特别是在科学团体）中的传播，共享某一给定思想的人数的确很重要。在民主选举中，人们关注某些思想

的程度，竟然以大多数人的意见为准。然而，大家都知道，即便是压倒性多数的拥护者也未必会保证一个观点一定正确，甚至也不能保证它最后能幸存下来。

一个与生物进化情形更加相像的情况，使我们可以转而讨论一下过去人类社会中的竞争。在很大程度上，适应性是以人口总数来衡量的。比如在东南亚，一些民族群体从事以水稻种植为主的农业，而另一些人则常常是通过砍烧森林的方式来种植旱稻。种植水稻的人们，比如中部泰国人、老挝人或越南人，在每单位面积上所养活的人数比其他人群所能养活的人数多得多。密集的人口促使他们得以统治种植旱稻的人们，并在许多情况下把那些人赶到遥远的山区。展望未来，我们很有理由发问，继续像上述那样以密度或总的人数来决定孰赢孰输是否理想。

小生态环境的填充

从长期来看，强调死亡与种群的生物进化，在小生态环境产生时去填充它们就显得相当有效。当存在一个以某种方式生存的机会时，某种生物就很可能进化到可以利用它，即使那种生活方式在人类观察者看来似乎相当古怪。

从这方面来说，拿生态群落与市场经济进行类比是很中肯的。当经济中存在一种赢利机会时，个人或公司可能会（虽然不是肯定如此）立即利用它们。这种情况下与死亡相对应就是破产，财产作为种群个体数的类比物，是公司适应性的一种粗略量度。

在经济学与生态学中，一种新商业或一种新生物（或者说，一个现有公司或生物中一种新型行为）的出现，将改变群体中其他成员的适应性景观。对一门商业或一个物种来说，那个景观是不断变化的（不包括开始时无确切定义的情形）。

这两种情形说明了，一个复杂适应系统在形成之后为什么能够填充小的生态环境，在填充过程中又如何能创造出新的小生态

环境，以及接着又怎样去一一填充那些新产生的小生态环境，等等，而且在此期间新的复杂适应系统不断产生。（如图 2—1 所描绘的那样，生物进化产生了哺乳动物免疫系统，产生了学习和思考，通过人类又产生了能学习和适应的社会，最近又产生了能充当复杂适应系统的计算机。）

在不断寻找机会、试验新奇事物的过程中，复杂适应系统增加了自身的复杂性，并偶尔发现一些关口事件，这些事件使包括新型复杂适应系统在内的一些全新结构的出现成为可能。如果时间足够长，那么智力进化的可能性似乎就会很大。

天文学家和行星科学家不知道为什么在我们的银河中或宇宙别处一些相似的银河中，行星系统会那样地稀少。研究生命起源的理论家们也没有提出任何特别的观点，来说明约 40 亿年前我们行星（地球）上的条件是那样地恶劣，以至生命（或类生命物）的起源是一个极其不可能的事件。也许，宇宙中充满复杂适应系统，其中大部分已经发展到或将发展到智力的进化。前面已经提到，寻找地球外智慧（SETI）在统计方面的主要未知资料是单位体积空间中存在智慧人类的行星数量，及他们那拥有无线电信号发射的技术文明时期通常能持续多长时间。我们可从地球上各种自然群落学习到的知识量十分巨大，可从各种人类社会学到的东西也非常多，但是，想像一下（像科幻小说家有时所做的那样）同地球外生命接触时，你可以学到的关于复杂适应系统怎样利用大量环境的经验，你将会更加惊讶。

鸟类中的欺骗行为

为了举例说明一个物种在同其他物种相互作用的过程中对机会的利用，我们可以转而讨论与人类有别的动物的欺骗行为。拟态式的欺骗是人们最为熟悉的；比如维色丽（viceroy）蝶同王斑蝶很相像，因而前者可以从后者的不良习性中获益。（旧大陆的）布谷鸟与（新大陆的）牛鸟则是另一种形式的欺骗，它们将自己

所产的卵放到其他鸟类的巢中；外来的小鸟届时将毁掉或杀死本属于该巢的卵或幼鸟，从而独获养父母的爱心。那么实际中的撒谎情形如何呢？

我们习惯于听人说谎，不过其他生物的撒谎行为似乎更令人惊异。当阿根廷海军在议会即将考虑防务预算之前，声称在里德拉普拉塔海湾发现一种神秘的潜水艇的潜望镜时，我们猜测，海军之所以施行这种欺骗行径，是为了得到额外的资助，对此我们也并不感到特别的惊奇。但出乎我们意料之外的是鸟类中也有相似的行为。

最近，我的朋友，鸟类学家查尔斯·芒恩（Charles Munn）在研究秘鲁马奴国家公园低地热带森林中的混合摄食群时，发现了一个这样的例子。某些鸟类一起在森林植被的底层觅食，其他一些则在中层觅食，上层的彩色食果裸鼻雀有时也加入到它们之中。（冬天，在那些群体中能发现几种北美候鸟。在南美与中美靠北部的地方，这样的候鸟更多。我们北美的居民只知道它们是夏天筑巢的鸟类，而不知它们在遥远的地方过着怎样一种完全不同的生活。若它们必须年复一年地返回巢穴，那它们在南方的栖息地就必须得到保护。同样，如果北美森林被砍伐成一片片比现在所幸存的更小的小树林，那么它们返回到这些国家也将非常地危险。首先，变小的森林将使寄生牛鸟有机可乘，而进行进一步的侵害。）

在每个混合摄食群中，都有一到两种负责站岗放哨的鸟，它们在附近飞来飞去，而且通常在接近群体中心或下面的位置。站岗者通过一种特别的叫声来警告其他的鸟类：附近可能有猛禽。查理注意到，底层群体的站岗者有时即使在没有明显的危险时也会发出警报。经过进一步观察，他发现，伪造的警报常常能使站岗者抢得一点汁多肉厚的美味佳肴，否则将被群体中另一个成员所吃掉。更仔细的观察表明，这些站岗者的行骗率大约为15%，并经常从中获利。为探究这种现象是否可能具有更大普遍性，查理研究了中层群体的行为，并发现那里的哨鸟也有同样的

行为。对这两种哨鸟来说，错误信息所占的比例大致相同。或许，行骗率高得多的话，信号将不被群体中其他鸟类相信（这使人想起“狼来了”的故事），而如果比例远远低于 15% 的话，那么哨鸟可通过撒谎来获得额外食物的机会就被部分地或全部浪费了。使我感兴趣的是通过某种数学推理而得出这个约为 15% 的数字的富有挑战性的工作；它能够在一个似真的模型中，以 1 除以 2π 的方式而得出吗？

当我以这个问题问查理时，他想起了他父亲告诉过他的一件事情，是关于第二次世界大战期间在英国基地的加拿大皇家空军部队的故事。他们发现，在同时出动一架战斗机与一架轰炸机的时候，不时地通过将战斗机置于轰炸机之下而非相反的方法去欺骗德国空军非常有用。经过大量试误之后，他们按照每七次行骗一次的方式进行。

小步伐与大变化

在讨论关口事件时，我们列举了生物进化中一些看似巨大跳跃的例子；但我们同时也指出，这是一些稀有事件，位于具有各种大小的整个变化分布谱的一端。位于分布谱另一端附近的微小变化比它们普遍得多；不管事件大小如何，生物进化通常都是在已有的基础上进行的。已有的器官可适应于新的用途。例如，人的手臂只是稍经进化的前腿。在整个生物的革命性再设计中，结构并没有被突然摒弃。突变和自然选择的机制对那种不连续性并不有利，然而革命性变化的的确确地发生了。

在“中断平衡”现象中，我们讨论了这种突然变化可能有哪几种不同的起源。其中之一是导致选择压力发生重要改变的物理化学环境的变化。另一种是“漂变”的结果，那些并不妨害（有时是没有显著改变）表型生存能力的中性突变，逐渐导致基因型的一种不稳定性。在这种情况下，对生物来说只有一个或者少数几个突变才能够引起显著的差别，并能为其他一系列物种发生一

连串变化打下基础。一些微小的变化能引发关口事件，后者往往是生物化学的，它们为生命形式开辟出新的领域。在有些情况下，这些革命性的变化是由于多个生物集聚成复合结构而引发的。但在每种情形中，变化的基本单元都是对已有物质发生作用的一种突变（或重组，不管其有无交换）。全凭虚构是什么也发明不了的。

对复杂适应系统来说，这一原理的普适性程度如何呢？例如，在人类思考中，必须一小步一小步地进行吗？发明过程只需要对所存在的事物作一系列微小变更吗？为什么一个人不能发明一个崭新的、完全不同于任何已有东西的仪器呢？在科学中，为什么不能构思一个与以前的观点彻底不同的新理论呢？

研究（与日常经验）似乎表明，实际上，人类思想通常确实是以联合与按部就班的方式发展的，在每一个阶段，对原有思想作出一些特殊的修改。但是在发明、科学、艺术及其他许多人类作出贡献的领域中，有时确实也会出现一些极其新颖的结构。这些突破使我们想起生物进化中的关口事件。它们是如何发生的呢？难道人类的创造性思想在这些不同的活动范围内遵循不同的模式吗？或者还牵涉到某个普遍性原理？

第十七章 从学习到创造性思维

我们先通过一些实例来讨论理论科学的创造性成就，然后揭示它们和其他领域创造性成就的关系。

一个成功的新理论思想，其典型特征是改变和拓展理论现有的主干，使之符合被观测到的事实，而这些事实以前无法说明，也无法与以前的理论相容。新理论思想可以作出新的预言，而且这些预言有朝一日会受到检验。

凡新颖的思想几乎总是包含有一种否定的洞察，即认识到某些以前被接受的原理错了，必需抛弃（由于历史的原因，一个早期正确的思想经常伴有一些智力上多余的、不必要的东西，它们现在必需抛弃）。无论如何，我们只有摆脱被接受的那些有严格约束的思想，才有可能前进。

有时候一个正确的思想首次被提出来和被接纳时，常常被解释得太狭窄。在某种意义上说，它的一些可能的推论还没有得到足够充分的认识。以后，无论是最初提出新思想的人，或者是其他一些理论科学家，必然会又回到那些推论，这一次将比原来的

认识深刻得多，于是其全部的意义才被人们充分了解。

我们可以用爱因斯坦 1905 年首次提出狭义相对论（那时他 26 岁）的例子说明：反对一个已被接受的错误思想和回到一个正确的思想，一般说都不是一蹴而就的。爱因斯坦摆脱了已被人们接受的绝对时空的错误观念，而后他指出，麦克斯韦电磁理论中方程组的对称性可以作为一般性原理，这就是狭义相对论中的对称性。但在当时，人们只是狭隘地将这些对称性应用于电磁理论，而并没有，举例说，应用到粒子动力学中。

由个人经验得到的一个例证

我很高兴有幸能在基本粒子理论中提出几个有用的思想，这思想当然和爱因斯坦的不同。非常有意思的是，这次个人经历使我有了一些体会：如何将创造性行动应用到理论科学中去。

有一个例子，来自我的事业极早期，足以说明我的体会。1952 年，我到芝加哥大学工作，我试图对新的“奇异粒子”（strange particles）的行为作出解释。我们称它为“奇异”粒子，是因为它们具有由强相互作用产生但却由弱相互作用缓慢衰变的奇异性质。（这儿所说的“缓慢”是说其半衰期约为 10^{-10} 秒，而强相互作用粒子态正常的衰变的半衰期是 10^{-24} 秒左右，大致上是光通过这样一个粒子所需的时间。）

我正确地推测出造成奇异粒子大量产生的强相互作用，被某些定律阻止诱发某种衰变，这种衰变后来被弱相互作用迫使其缓慢进行。但是，是什么定律呢？物理学家曾经长期猜测强相互作用中有一个量守恒，这个量被称为同位旋 I（isotopic spin），它的值是 0, $1/2$, 1, $3/2$, 2, $5/2$, 等等。正在这时，由费米领导的一个物理学家小组收集到许多有利于这一思想的实验证据，而我则决定考察一下，看同位旋守恒是否正是我要寻找的那个定律。

传统的看法是核（强相互作用）粒子态（如中子、质子等费

米子)一定具有 $1/2$ 、或 $3/2$ 、或 $5/2$ 等等的 I 值,这是根据中子和质子的 I 值是 $1/2$ 这一事实推演出来的。(这种思想又被下一事实所强化,即费米子的自旋角动量必需等于 $1/2$, 或 $3/2$, 或 $5/2$ 等等。)与此相似,人们相信玻色子强相互作用粒子(介子)的 I 值一定等于 0 , 或 1 , 或 2 等等,这是因为已知的 π 介子的 $I=1$ 。(与上面情形相似,玻色子的自旋角动量必需是一个整数,因而强化了已被接收的思想。)

一组奇异粒子(现在称为 Σ 和 Λ 粒子)由强相互作用的费米子缓慢地衰变成的 π 介子 ($I=1$) 加上中子或质子 ($I=1/2$) 构成。我想,可以指定这些奇异粒子的自旋 $I=5/2$, 这样就可以防止强相互作用诱发这种衰变。但这个想法后来行不通,因为电磁效应(如发射一个光子)可以改变 1 个单位的 I 值,因此,用别的方法防止迅速衰变是不可能的。后来普林斯顿高级研究所邀请我去谈谈我的想法以及为什么这想法没有成功。在讨论 Σ 和 Λ 粒子时,我当时想说“假定它们的 $I=5/2$, 那么强相互作用就不能诱发它们衰变”,然后证明电磁理论毁灭了这种设想,因为 I 由 $5/2$ 变为 $3/2$, 这就允许所讨论的衰变在强相互作用下迅速衰变。

但由于讲话时口误,我把“ $I=5/2$ ”讲成了“ $I=1$ ”。突然,我僵住了: $I=1$ 正是我所需要的呀!电磁理论不能把 I 由 1 变成 $3/2$ 或 $1/2$, 因此,奇异粒子的行为用同位旋 I 守恒的方法,可以得到完全的解释。

但是,众所公认的规则,即费米子强相互作用粒子态的 I 值,为什么一定是 $1/2$, 或 $3/2$, 或 $5/2$ 呢?我立即明白,这种规则只是一个假定、推测,事实并不一定非如此不可。这种多余的、不必要的规则,是与同位旋 I 这一有用的概念一起提出来的。现在是清除这多余规则的时候了。这样一来,同位旋的应用比以前更加广泛。

于是,奇异粒子衰变的解释竟然起因于口误。后来证明,这一解释是正确的。时至今日,我们对这一解释有了更深刻的认

识，而且有了一个更简单的叙述方法：奇导粒子态不同于我们更熟悉的粒子如中子、质子或 π 介子，是因为它至少有1个s（或“奇异”）夸克，取代1个u（或d）夸克。只有弱相互作用可以把一个味夸克转变为另一个味夸克，而这种过程恰好比较慢。

表达创造性思想的共同经验

1970年左右，有一小群物理学家、生物学家、画家和诗人聚集在科罗拉多州的埃斯彭（Aspen），讨论获得创造性思维的经验。我是这一小群人中的一个。我们每人描述各自工作中的一个偶然事件。我举的例子就是在普林斯顿演讲时发生口误的事件。

会议记事上显示出惊人的一致看法。我们每人都发现，在已经确立的工作方法和我们必须去完成某件事情之间，有一个矛盾：在艺术上，是表达一种情感、一种想法、一种洞见；在理论科学上，是解释某些实验事实，但却面对一种已被接受的“范式”（paradigm）不允许这样的一种解释。

首先，我们已经工作了几天、几周或几个月，我们脑子里装满了研究中所遇到的困难以及试图克服困难的想法。其次，有一段时间继续有意地去思考，毫无用处，就是整天不停地思考也没用；最后，当我们骑自行车、刮胡子或做饭时（或者像我说的发生口误），关键性的思想突然冒出来了。我们撼动了我们熟悉的常规。

我们在我们的故事中表达了完全一致的看法。后来我知道，这种关于创造性行动的洞见其实早就有了。19世纪末伟大的生理学家和物理学家亥姆霍兹（H. von Helmholtz）把提出一种思想分为3个阶段：饱和、潜伏和启发（saturation, incubation, and illumination）。一个世纪以后，我们在埃斯彭的一伙人完全同意他的看法。

现在我们来看看第二阶段（潜伏）发生些什么事情。根据精神分析的定位，在所有其他解释中，只有一个解释突然呈现在

“前意识头脑”（preconscious mind）中，它恰好在意识外的边缘处。这种情形出现在潜伏期不断的智力活动中。但我个人的经验，即正确的答案出现在口误的时候，却很难适用上述解释。有些不相信这种研究方法的心理学家提出了另外一种意见，他们认为在潜伏期没有什么事情真的发生过，但也许对虚假原理的信心减弱了，而这种虚假原理一直阻碍人们寻求一种解答。于是，按照他们的观点，真正的创造性思想正好在启发到来之前产生了。无论怎么说，在饱和和启发之间经历了一段明显的时间间隔，我们可以把这段时间看成是潜伏期，在这段时期里我们可以想像：紧张思考使我们走向了无意识状态，或者恰好允许偏见逐渐失去阻碍人们获得一个答案的能力。

1908年，彭加勒（Henri Poincaré）加了一个第四阶段——验证，这一阶段虽然非常明显却十分重要。他描述了自己的经历，即如何提出一类数学函数的理论。他对这个问题持续不断地思考了两个星期，但毫无结果。有一个晚上他失眠了，他似乎觉得“各种思想纷至沓来，我感到它们不断地冲突、碰撞，直到它们成对地相联，也就是说，形成了一种稳定的联合”。但他仍然没有获得答案。但在一两天之后，他和一些同事作一次地质考察，他正要登上马车时，“一个思想突然闪现在我的脑海中，而在此之前我似乎从来没有想到过，这个思想就是，我用来定义这些函数的变换与非欧几何变换是等价的。我没有去验证这种思想就坐到了我的座位上，和旅伴们开始闲聊起来，但我感觉到我刚才的思想是完全没问题的。待我回到卡昂之后，为了能问心无愧，我还是证实了这个结论”。

心理学家沃纳斯（Graham Wallas）在1926年正式描述了4阶段过程，从此以后，它成了心理学有关分支的标准理论，虽然我们在埃斯彭开会时从来没听说过。我第一次知道这个理论，是偶然从一本由亨特（Morton Hunt）写的通俗书籍《宇宙之内》（*The Universe Within*）里知道的，上面的引文也是从这本书中转引过来的。

潜伏期可以缩短或绕过去吗？

那么，我们必须经过潜伏期吗？我们能够缩短潜伏期或干脆绕过它，这样我们可以不必等那么长的时期就得到必需的新思想。我们能找一条捷径，避开我们习惯了的智力常规吗？

不少人提出传授思维技巧的特殊方案，他们相信他们能够提高这些技巧中的一个，即创造性思维。为了帮助使思维过程脱离常规，有些建议非常适合于按复杂适应系统来讨论这个过程。一般来说，学习和思维是作为复杂适应系统在工作中的例证。或许在地球上，这类技巧的最高级表达就是人类创造性思维。

按一种适应性景观所作的初步分析

就像对复杂适应系统所作的其他分析一样，先介绍适应性和适应性景观的概念是有益的，虽然这些概念常常过分简化而太理想（即使在生物进化的情形下也大多如此）。在思维过程中出现的选择压力（selection pressure）看来不大可能用有明确定义的适应性来表示。

这对于艺术家寻求创造性思想尤其真实。在科学中，这个概念可能更接近于可以应用。一个科学理论思想，我们说它合理是由于它改善了现有的理论，例如解释了一些新的观测，而与此同时又维持或增加了已有理论的一致性和解释能力。总之，我们想像我们有了一个有关创造性思想的适应性景观，然后我们将继续把正在减低的高度和正在增加的适应性联系在一起（与图 16—2 对照）。

如我们在生物进化中所见的情形一样，假定一个复杂适应系统仅仅向下滑到景观中去，这就太简化了。当系统进入一个洼地后，系统将持续向下滑，直到洼底为止。洼底是局域最合理的地方。这种使系统向下运动到底部的区域，被称为吸引域。如果系

统仅仅只作下滑运动，那么它非常可能停留在一个浅洼的底部。放大尺度之后，有很多浅洼，其中许多浅洼比系统发现的那个要更深一点（也就是更合适，更“合意”），如图 16—2 所示。但系统怎样才能探查到其他那些浅洼呢？

有一个办法可以逃出吸引域，如前面在生物进化中讨论过的一样，这涉及到噪音，这就是说，偶然运动叠加到下降趋势上。噪音使系统有机会逃离一个浅的洼地，寻求一个近旁较深的洼地，这种过程一再重复，直到到达真正最深的底部。但是，这噪音引起的偶然偏移振幅不可太大，否则会对下降过程的干涉太大，使得系统即使发现了一个深的浅洼也不在那儿停留。

另外一个可能性是在持续向下蠕动时有一些暂停的间歇，允许系统比较自由地向邻近处探寻。这样可以允许它们在附近发现较深的洼处。在某种程度上，这些暂停就相应于创造性思维中的潜伏期过程，在这过程中，对所需思想有条不紊的探索会暂时停止，而意识外的探寻却仍然在继续。

关于如何逃入一个较深浅域的一些说明

为了加速想出一个创造性思想，有人提出的一些建议很适合这样一种设想，即控制噪音水平，避免停在一个太浅的吸引域。一个系统可以利用一种随机扰动逃离最初的域（basin）。例如，狄玻洛（Edward DeBono）建议把这种方法应用于一个问题，即，不论什么问题，只要是今天报纸第一版最后一个名词所蕴含的问题就行。这可是真正的随机！

另外一个方法与灵机一动相近，这种方法从战后一直到现在都常被人用到。有些人试图用下面方法寻找一个问题的答案：在一个小组讨论会上，鼓励人们在另外一个人建议的基础上寻求答案，但不论这个建议如何古怪，不能攻击。一个疯狂或自相矛盾的建议可能代表一种不稳定的思想状态，而这一思想可以导致一个解答。狄玻洛喜欢引用的一个例子是讨论控制江河污染。有人

可能提出：“我们需要真正确定的是，能否让这些工厂处于自己的下游。”这显然是一个不可能的建议，但是有人还是可以从得出一个更严肃的建议，他说：“你可以按这种建议要求每个工厂的水的人口，处于这个工厂排污出口的下游。”这个疯狂的想法可以看成是一个适应性景观的起源，它可以引向一个比讨论开始时更深的域。

思维技巧的转移？

爱德华和许多人准备在学校里开设一门专门课程，传授思维技巧，他们还想为公司，甚至为邻居们也讲授这种技巧。其中有些技巧与如何获得创造性思想有关。现在，很多这类课程在世界各地都先后出现了。例如，现任委内瑞拉总统创立了一个智力部（Ministry of Intelligence），以鼓励在他们国家里传授思维技巧。在这个新部的赞助下，非常多的学生学习了各种思维课程。

这些课程的内容多半强调有特殊范围的思维技巧。例如，爱德华留下的许多练习中都是我应该称之为政治分析或政治学习之类的东西。这些练习有些是在一些行动课程中作出选择，行动的层次有个人、家庭、组织、村镇或市、州或省、国家或跨国团体。（举个例子，这样的练习可以这样开始：假定一个特殊的新法律通过了，然后，对这法律可能的后果也作了讨论。）这些内容明显地与发现和分析论据以决定赞成或反对各种已知可自由选择的对象有关，也与发现新的选择有关。

有一个问题常会自然地出现，即在学习思维技巧时，思维技巧在什么程度上可以传给别人？训练人的大脑去思考如何选择新的政策方针（或判断旧有选择的相对价值），真能帮助一个人在科学领域发现新的思想，或创造出伟大的艺术作品？这种大脑训练方式，真能帮助一个人在学校学习科学、数学、历史或语言？也许有一天会对这些问题给出答案。而现在，只有非常初始的信息在逐渐被我们利用。

测试各种推荐的方法是否切实可行

当一个人学习了一门思维技巧课程以后，我们很难确定，学生创造性思维能力是否真的有了改善。一个理想的办法是定下一个标准的测试方法，使对此有兴趣的参与者如双亲、学校、政府部门和议员们对学习结果有深刻印象。但是，怎么样才能有一个标准的测试来测度创造性思维？有一种办法是设计一些问题。例如，有人告诉我，在委内瑞拉学习了思维技巧的学生，要求他们为一个小公寓设计一张桌子。可以料想到，只要打分的人仔细一些和富有想像力，那么这种问题的答案就可能给出某些启示，由此可以看出学生是否吸收了某些创造性思维的技巧。

哈佛教育研究院的伯金斯（David Perkins）也被涉及到设计桌子的问题中，他特别感兴趣的是整个讲授思维技巧的课程，而不是那些特别实用的课程。他强调说，创造性思想的需要不仅仅起因于科学和艺术领域的需要，而且也由于日常生活的需要。他举了他朋友的一个例子，有一次他与几个人到郊外野餐，大家都忘了带一把刀来切乳酪，但他的朋友却想到用信用卡把乳酪整齐地切下来，让大家大为高兴。

大卫指出研究已经证实，一些有特殊性格的人经常取得成功，在思想领域里如此，在逃离一个吸引域而进入另一个较深的域也如此。这些特殊性格是什么样的性格呢？是对任务的献身精神，是对陷入一个不合适领域的一种警觉意识，是习惯于在不同领域边缘作拉锯战，一种详细阐述和解决问题的能力。这些性格似乎不可能是生下来就有的，而很可能是反复学习才能获得。但今日学校还远远没有认识到这种学习的重要性。大卫举例指出，学校成了这样的地方：仅仅去发现那些已经详细阐述过的问题。

问题的阐述和一个问题的真正边界

问题的阐述涉及发现问题的真正边界。为了说明我说的是什么意思，我将以我的朋友、原来的邻居和耶鲁大学的同班同学麦克里迪（Paul MacCready）经常在公共演讲时举的例子，这是关于问题异常解的一些例子。（保尔是自行车动力飞机、太阳能飞机和模拟扑动翼手龙的发明者，他还发明了一些其他装置，他自己谦虚地称之为“空气动力学逆向前沿”的发明。）虽然我用了他用过的相同的例子，但我从中得出的教益与他的有些不同。

我们来考虑一个著名的问题：“用铅笔把9个点用最少的直线联起来，在画线时铅笔不准离开纸面。”很多人都设想画的直线只能在9个点组成的方形之内，虽然这种限制在问题中并没有提到过。如果画线的人让自己把直线拓展到方形之外，那么他只

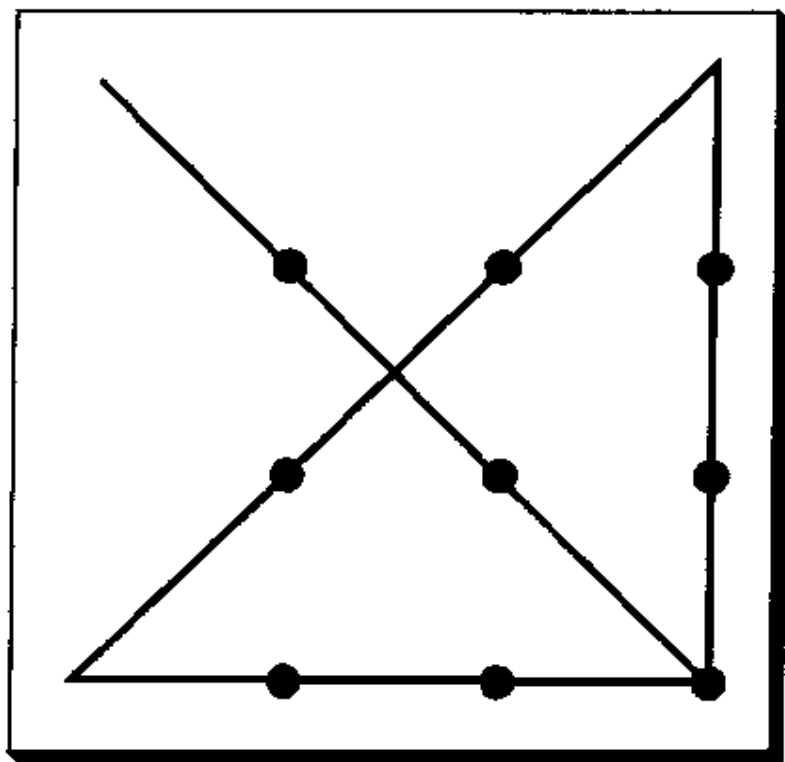


图 17—1 铅笔不离开纸面用 4 条直线把方块中的 9 个点联结起来

用画 4 条直线就可以完成任务（如图 17—1 所示）。如果这是现实世界中出现的一个问题，那么很关键的一步是在阐述这个问题时，要找出有没有任何理由把直线限制在方形之内。这一步我称之为问题的边界（the boundaries of the problem）。

如果问题允许直线越出正方形之外，那也许还有其他的一些自由。如果我们把纸折叠一下，让 9 个点排到一条直线上，那么铅笔只用画一条直线就穿过了 9 个点。不是吗？亚当斯（James L. Adams）在他的一本名为《概念大拍卖》（*Conceptual Blockbusters*）里，有许多这样的思想测试。其中最妙的一个是一封信的内容，这是一个小女孩写给他的，下面我们印下信的复制件。最紧要的一点是她写的最后一句话：“这不是说你不必用一根粗线。”这儿的粗线是被禁止使用，或不被禁止使用？现实世界的规则是什么样的？

像通常情形一样，在对问题进行阐述时边界问题是一个原则问题。在华盛顿大学物理系卡兰得拉（Alexander Calandra）教授写的一篇文章“气压计的故事”^{*}中，他对于这一点强调得更明确。

很久以前，我接到我的同事一个电话，他问我愿不愿意为一个试题的评分作鉴定人。好像是他想给他的一个学生答的一道物理试题打零分，而他的学生则声称他应该得满分，这位学生认为如果这种测验制度不和学生作对，他一定要争取满分。导师和学生同意将这件事委托给一个公平无私的仲裁人，而我被选中了……

我到我同事的办公室，并阅读这个试题。试题是：“试证明怎么能够用一个气压计测定一栋高楼的高度。”

学生的答案是：“把气压计拿到高楼顶部，用一根长绳子系住气压计，然后把气压计从楼顶向楼下坠，直

* 转引自《现代科学》（*Current Science*）（教师版），Vol. 49, No. 14, Jan. 6 - 10, 1964, ——作者

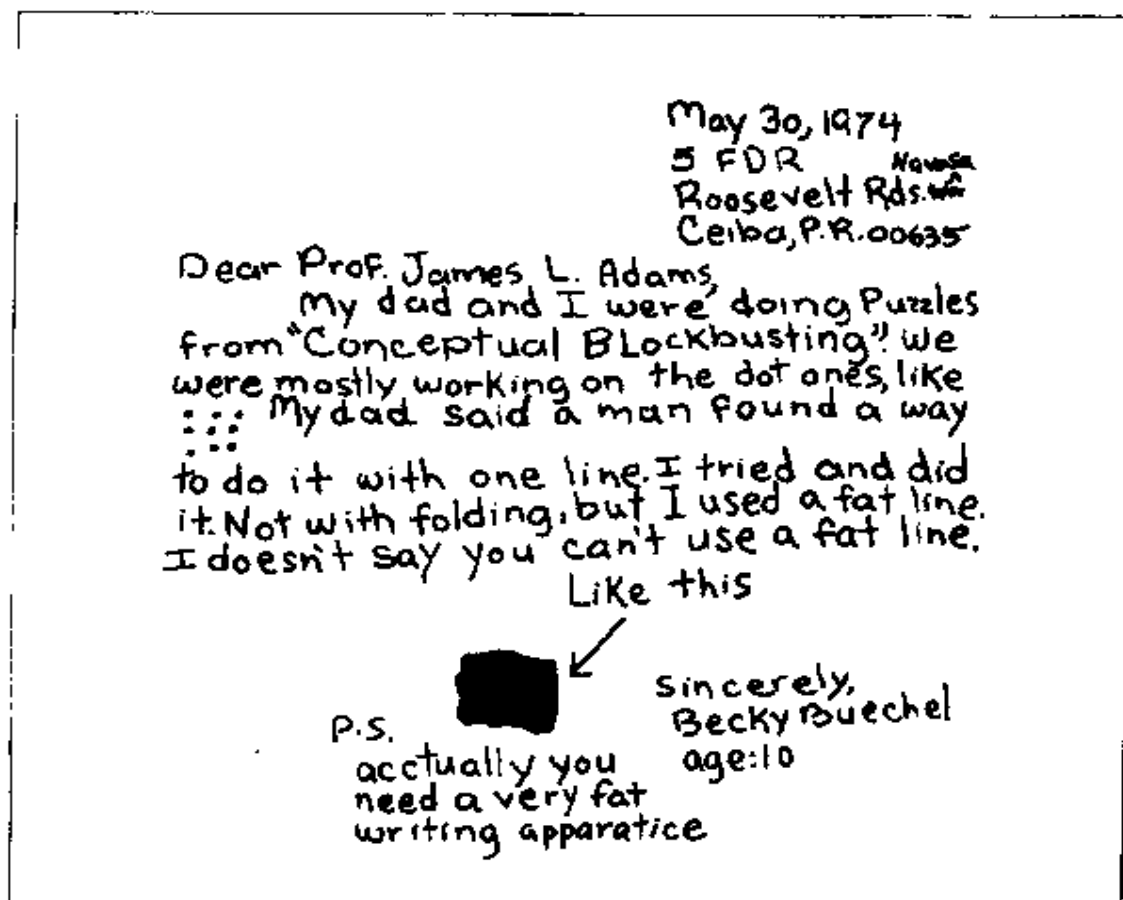


图 17-2 一个 10 岁小女孩写给亚当斯教授的信（摘自《概念大拍卖——如何获得更好的想法》（*Conceptual Blockbusting——A Guide to Better Ideas*），Addison-Wesley, 1986, P.31）

坠到街面为止；然后把气压计拉上楼顶，测量绳子放下的长度。这长度即为楼的高度。”

这是一个很有趣的答案，但是这学生应该获得称赞吗？我指出，这位学生应该得到高度评价，因为他的答案完全正确。另一方面，如果高度评价这个学生，就可以给他物理课程的考试打高分；而高分就证明这个学生知道一些物理知识，但他的回答却又不能证明这一点。考虑到这一点，我建议让这个学生再次回答这个问题。我的同事同意这么做，这当然是意料之中的事，但让我惊讶的

是这个学生也同意再试一次。

按照协议,我让这个学生用6分钟回答同一问题,但必须在回答中表现出他懂一些物理知识。5分钟过去了,他什么都没有写。我问他是否愿意放弃,因为我还得去别的班级上课,但他说不,他并不打算放弃,他有许多答案,正在思考用最好的一个答案。我向他表示抱歉,打断了他的思路,并请他继续考试。在最后一分钟里,他赶忙写出他的答案,它们是:把气压计拿到楼顶,让它斜靠在屋顶边缘处。让气压计从楼顶落下,让停表计下它落地所需的时间,然后用 $S = 1/2at^2$ (落下的距离等于重力加速度乘下落时间平方的一半),算出建筑物的高度。

看了这答案之后,我问我的同事他是否让步。他让步了,于是我给了这个学生几乎是最高的评价。正当我要离开我同事的办公室时,我记得那位同学说他还有另外一个答案,于是我问是什么样的答案。学生回答说:“啊,利用气压表测出一个建筑物的高度有许多办法。例如,你可以在有太阳的日子,在楼顶记下气压表上的高度和它影子的长度,又测出建筑物影子的长度,就可以利用简单的比例关系,算出建筑物的高度。”

“很好,”我说,“还有什么答案?”

“有呀,”那个学生说,“还有一个你会喜欢的最基本的测量方法。你拿着气压表,从一楼登梯而上,当你登楼时,用符号标出气压表上的水银高度,这样你可以用气压表的单位得到这栋楼的高度。这个方法最直截了当。”

“当然,如果你还想得到更精确的答案,你可以用一根弦的一端系住气压表,把它像一个摆那样摆动,然后测出街面和楼顶的 g 值(重力加速度)。从两个 g 值之差,在原则上就可以算出楼的高度。”

最后他又说:“如果您不限制我用物理学方法回答这个问题,还有许多其他方法。例如,你拿上气压表走到楼

房底层,敲管理人员的门。当管理人员应声时,你对他说下面一句话:“亲爱的管理员先生,我有一个很漂亮的气压表。如果你告诉我这栋楼房的高度,我将把这个气压表送给您……”

第十八章 迷信和怀疑论

与有特色的选择压力不同的是,在叙述科学事业(至少它的全盛时代)的特征时,不同的选择也会影响理论思想的进化(这些思想有相同的主题,目前已形成科学的范围)。一个例子是向权威求助,而不去与自然相比较。在中世纪和欧洲早期,向权威求助(例如求助于亚里士多德,以及更多地求助于罗马天主教堂)在当时是这个领域的标准做法,到后来才广泛求助于科学方法。当1661年伦敦皇家学会建立时,那时选择的箴言是 *Nullius in verba*,它的意思是“不要相信任何人的话”,反对向权威求助,而提倡求助于大自然,用一种“实验哲学”来训练学生。现在“实验哲学”被称为自然科学。

我们提到了早期的信仰系统,例如交感巫术,它对选择压力的主要应答,和预言与观测进行比较十分不同。在最近几个世纪里,科学事业造出了一个使它繁荣的领域,在这个领域里权威和神秘的思想大部分退出了,让位给观察和理论的合作。但在这个领域之外,旧有的思维方式仍占有很大地盘,迷信仍然到处泛滥。

科学存在的同时迷信也普遍存在,这是不是人类的一个特殊现象?甚至是否可以认为,只要宇宙中有智力复杂适应系统存在的地方,都会有相似的倾向?

规律性求证中的错误

复杂适应系统从它们接受的数据流中得出规律性,并把这种规律性去粗存精地制成一种图式。因为在这过程中容易犯两种典型的错误——把随机的东西误以为是规律性的东西,或者相反——因此我们有理由假定,复杂适应系统将会逐渐适应于一种大致上平衡的状况,在这种状况里某些规律性正确的证明将伴随着两种错误。

在考虑人类的思维模式时,大致上说,我们会用错误的方式证明一种迷信,同时又否认另一些迷信。迷信的典型特征是把事实上不是规律性的东西看成是规律性;而当规律性要放弃一些证据时,迷信又加以拒绝,即使非常明显地错了也是如此。经过内省和利用其他人的观察,我们中的每一个人都会察觉在两种错误与恐惧间有一种联系。

在一种情形下,由于我们周围许多事物的不可预见性,特别是不可控制性,在人们精神上留下了创伤。有些不可预见性从根本上是滋生于量子力学基本的不可确定性,和混沌指出的预见进一步的限制性。大量额外的粗粒化,与由此而来的不可预见性,来自于我们的感觉和仪器在范围和能力方面受严格限制。我们只能偶而获得有关宇宙的一点点信息(在原则上可以有用的那一点点)。最后,我们受到我们不能胜任的理解力和有限计算能力的限制。

由于结果的不可理解,使我们感到害怕,于是我们把一些在虚假因果原理上建立的人工秩序,强加在我们周围世界,甚至强加在一些随机事实和偶然现象上。我们就这样,用一种虚幻的预见能力,甚至是神秘能力来安慰自己。我们幻想我们可以操纵我们周围的世界,借助的是我们发明的想像力。

在否定、拒绝的情形下，我们能够发现真正的模式，但却又被它们震吓得不知所措，因而我们未能明白它们的进展过程。显然，在我们生活中最震撼人心的规律性是死亡的确定性。有许多信仰，包括有些最执着的信仰，都要设法减缓对死亡的焦虑。当这类信仰广泛进入一种文化中时，它们对个人的安抚效应就会大大增加。

但这类信仰明显地包括一些人为的规律性，所以，否定就伴有迷信成分。我们还可以进一步看看交感巫术这种迷信。我们看到，这其间的信仰能维持的仅仅是否定他们明显的过失，特别是他们工作中经常出现的错误。对真正规律性的否定和强制性相信虚假的东西，可以看成是一个银币的两面。不仅仅是人类对这两者有癖好，而且这两者常有相伴的趋势，而且它们彼此支持。

如果这种分析是公正的，那么我们可以作出结论：所有散布于宇宙各处行星上的智慧复杂适应系统，在用他们的输入数据证实规律性时，也会在两个方向上犯错误。按拟人学的说法，我们可以认为任何地方的智慧复杂适应系统，都易于成为一种迷信和否定的混合物。无论我们了解到这一点与否，从人类经验出发，用减轻恐惧的说法来描述这种混合物，又是另一回事了。

我们用稍微不同的方法来查看一个复杂适应系统的迷信，我们也许会发现迷信比否定还更普遍一些。可以认为这系统大部分已进化到可以发现模式，于是一个模式在某种意义上变成了它自己的回报，即使它对现实世界没有给予什么特别的好处。像这样的一种模式，可以看成是一个“利己图式”（selfish scheme），它有些像利己基因或者甚至是真正的利己基因。

这种例子在人类经验中不难找到。几年以前我被邀请会见一个由著名大学教师组成的小组，他们想与我讨论一个令人惊讶的新发现。后来我才明白，他们为最近由 NASA* 拍摄的一张火星

* NASA (National Aeronautics and Space Administration) (美国) 国家航空和航天管理局——译者注

的照片激动不已，因为这张照片上有一个有些像人面孔的图形。我无法想象就这种不大可能的事，与这些在其他方面很聪明的人进行什么深入的讨论，我能做到的无非是为发现了一个神秘的规则而真心地欢悦。

艺术和社会中的神话

对于人类，特别是到了社会层次的人类，除了恐惧减少了以外，在人类证实规律性的时候，还有许多真实世界的选择压力，喜欢歪曲事实。迷信信仰可以用来加强巫师、祭司、神父的权力。一个有组织的信仰系统，当它被神话完善以后，可以诱导人们按行动法典行事，并可加固一个社会成员的团结。

随着岁月的流逝，信仰系统可以把人类划分成不同集团，这不仅可以使不同集团的人内部团结一致，而且有时使不同集团彼此强烈竞争，还经常引发冲突或迫害，有时还伴以大规模暴力。不幸的是这种例子，在今日世界仍不难发现。

但是相互竞争的信仰，仅仅是把人类自身划分为不同集团、使彼此不能相容的一个基本原因。任何标签（label）都可以做到这一点。（关于 label，我们引用滑稽漫画中的一段话：“把什么东西给予人类，你就可以使他们无缘由地彼此仇恨。”）许多大规模的残忍暴行（和个人的残酷行为）是由于种族或其他原因引起，而和信仰没什么特殊联系。

伴随信仰系统的破坏效应，信仰系统也有非常积极的成就，特别对于光辉的音乐、建筑、文学、雕塑、绘画和舞蹈，它们由于受到特殊神话的刺激而意气风发。我们只要看一看古希腊时代画的黑色古瓮，就足以亲眼看到由于神话影响而释放出的能量。

面对这么大数量有关神话的名画，我们就有必要重新考查虚假规律性的意义了。除了对人类的智力、感情及创造辉煌的艺术产生了有力的影响以外，神话的信仰很明显还有更深层的意义，超越了字面上的谬误和它们与迷信的联系。它们把人类几百年、

几千年在与自然、与人类文化相互作用时所得到的经验，压缩为神话故事，它们所包含的不仅仅是教训，而且，至少从隐喻中指出行为的规范。它们是社会作为一个复杂适应系统中文化结构最有活力的一部分。

在艺术中寻找模式

神话中的信仰是艺术中灵感的源泉之一（正如它仅仅是憎恨和暴行的原因之一），但不仅仅由于与神话有关而使艺术受到联想模式和未被科学认识到的规律性熏陶。所有的艺术都是在识别、探索这样一些模式中茁壮成长。大部分明喻和隐喻都是科学忽视了的模式，而在文学中特别是诗歌中，怎么能够没有隐喻？在视觉艺术中，一件伟大的作品常常导致观察者获得一种新的欣赏方式。模式的识别和创造是每种艺术活动的本质。最终的图式易于受到选择压力的支配，经常（虽然不总是）远离在科学中的那些操作，取得惊人的结果。

我们至少可以用 3 种不同和互补的方法来看一看神话和巫术：

1. 作为吸引人但不科学的理论，将舒适但虚假的规律性强加于自然；
2. 作为文化图式可以使社会同一，可能不错，也可能很糟；
3. 作为大规模探寻模式、创造性联想的一部分，它包含有艺术作品，而这大大丰富了人类的生活。

信仰的一种道德价值

有没有什么办法从神话信仰中获取大量有价值的结果，而不伴随自我欺骗和偏执呢？大约在一个世纪以前，“战争的道德价值”这个概念曾被人们广泛讨论过。就我所知道的，其观点是认为战争可以激励人们对同志的忠诚、自我牺牲、勇气，甚至英雄

行为，战争还为爱情冒险提供一个好的去处；但战争也非常残酷，具有非常巨大的破坏力。因此，人们就奋起寻找战争的积极的、正面的特性，而忽略消极的一面。有些组织试图让那些没有机会到户外活动的年轻人到户外去冒险，以此完成鼓吹战争可以培养高尚道德的目的。他们指望利用这种活动不仅可以为战争，而且也可以为怠工、犯罪提供一种替代物。

人们会问，如果我们现在不考虑战争和犯罪，而考虑迷信，那么我们能否找到信仰的一种道德上的价值呢？人类能够从神话中得到精神上的满足、欣慰、社会的凝聚力和伴有神话信仰的辉煌的艺术创作，但如果同时不把神话看成是真正的真实，那该多好。但能够做到这一点吗？

礼仪的威力有可能部分达到这一目的。希腊的一个词 *muthos* 是神话 (myth) 的辞源，而 *muthos* 在古代就是一个伴随庆典的口头用语。在某种意义上，这种庆典的中心任务是演戏，而讲话则是第二位的。事实上，礼仪的原始意义经常（至少是部分）被忘却了，一些幸存下来的神话显示出一种努力，想利用过去的一些图画来对礼仪作出解释，以及想把古老传统的碎片聚到一起来表示遥远过去的文化的一个阶段。神话随着岁月的流逝也不断在改变，而与此同时礼仪的连续性却有助于社会团聚在一起。那么，只要有礼仪存在，神话中真正的信仰可不可以在不引发太多的混乱、破坏的情形下渐次衰微下去？

另外一个办法可能与我们察觉出有多少虚幻的故事和戏剧性事件有关。伟大文学的特征似乎是它有自己的生命，它们的经验经常被人们作为例子提到，这很像神话的特点，人们把这些例子作为智慧和灵感的源泉。但与此同时，并没有人把这些幻想的作品当作真正的真实。那么，也许这儿有某些机会，使许多信仰带来的社会和文化上的利益保存下来，而使自我欺骗的方面逐渐消失。

还有一种办法可能部分由神秘的经验提供。一些由迷信信仰所获得的精神上的好处，是否可以通过学习技术来替代？也许至

少有某些人可以用学习技术来改善这些经验？

非常不幸的是，在当今世界的许多地方，对神话的真正信仰还远未衰亡，甚至还在加强。不少地方还把神话作为原教旨主义运动聚集民众力量，向现代社会挑战，强迫人们按过去的行为方式生活，不准自由表达意见。（更有甚者，甚至在神话信仰力量衰落的地方，不同集团之间的关系也并未因此而有什么大的改善，因为任何这种信仰之间的轻微差异，都足以维持他们之间的敌对状态。）

要对迷信信仰整个论题作一次彻底、认真的讨论，我推荐舒马克（John F. Schumaker）的书《幻想的翅膀》（*Wings of Illusion*）。不过舒马克认为人类作为一个物种，不可能抛弃安慰，也少不了幻想，对此他很有些失望，但即便如此，他的书仍然是一本值得一读的好书。

怀疑运动

在刚刚过去的20年中，旧式迷信普遍伴有一种所谓新时代信仰的群众性高潮，至少在西方国家是如此。许多这样的新信仰只不过是现代的和伪科学的迷信，有时甚至是旧迷信加了一些新称呼，例如用“引导”代替“招魂术”。不幸的是，这些东西经常在新闻媒介和通俗书籍中被描述得好像是真的，或者是极可能的，于是一个反对这种迷信的怀疑运动（skeptics' movement）产生了。这个运动的地方组织在世界各地形成了集团。（我曾在3个这样的组织里度过了很长一段时间，他们可以用一种有益健康的怀疑主义药剂。这3个组织分别位于埃斯彭、圣菲和南加利福尼亚。）

地方怀疑运动组织与莫基于美国的一个委员会只有松散的联系，但却包容着世界各地来的成员；这个委员会的名称是CSICOP（Committee for Scientific Investigation of Claims of Paranormal，超自然现象科学调查委员会）。CSICOP出了一本杂志《怀

疑的探询者》(*Skeptical Inquirer*), 但 CSICOP 不是一个对公众公开的会员组织, 你必须被选中才能进入这个团体。虽然我对这种组织和它的杂志有一些保留看法, 但几年后我接受了推选, 因为我很喜欢它的工作。

所谓超自然的要求在我们四周比比皆是。有些非常滑稽可笑的东西常常出现在一些小型出版物的大字标题上, 这些出版物在超级市场柜台上出售。这些标题有: “猫子吃鸚鵡……现在它说话了……小猫想要一块薄饼。” “几百个人死而复生, 描述天堂和地狱。” “难以置信的鱼人可以在水下呼吸。” “连体双胞胎与他们的双头兄弟见面。” “外星人使我怀孕。” CSICOP 不在乎这些明显的胡说八道。但是, 当一些主要的报纸、杂志或广播及电视网把这些胡说八道不当回事, 认为那是司空见惯、没有挑战性或很有可能认可(虽然暂时没有完全认可), 在这种情形下, CSICOP 的成员倒会真正地感到烦恼不安了。例如, 当宣传媒介声称催眠可以使人回归到以前的生活中去, 心灵哲学或心灵致动(即人的心灵思考可以使外界物体运动)可以为政策提供有价值的帮助等等, 就出现过上述情形, 致使 CSICOP 的成员们烦恼不堪。这些断言对那些已被人们接受的、建立在事实基础上的科学规律是一种挑战, 尤其对那些在仔细研究后却发现非常缺乏证据甚至完全没有证据的科学规律, 更是严重的挑战。他们不断提醒传播媒介不要把这类规律当作是真实的或可能的, 我认为这是很有益的活动。

超自然的要求? 什么是超自然?

如果我们仔细研究一下这个组织名称的含意, 就出现了一些问题, 超自然的要求是什么意思? 当然, 对我们这些从事科学工作的人来说, 大都首先想知道: 任何所宣称的现象是不是真的发生过。我们对于所要求的内容是否真实, 特别小心认真。但是, 一个现象如果是真实的, 那又怎么能够是超自然的呢? 科学家以

及许多非科学家都相信，自然界要遵循确定的规律。因此，在某种意义上说，不可能存在什么超自然的现象。任何在自然界实际发生的现象都可以在科学的框架里予以描述。当然啦，我们不能总是用科学叙述的语式来谈论某些自然现象，例如，我们有时宁愿用诗歌的描述。还有些时候现象太复杂，用详尽的科学描述不合乎实际。但是，在原则上说，任何真实的现象必须与科学相容。

即使发现了什么新的现象（并可靠地证实了），这种新现象不能用现存的科学规律予以解释，我们也不必失望地举起双手。我们应该做的是扩大或在某些方面修改这些科学定律，以使它能容纳新的现象。这将使人们处于一个奇怪的逻辑地位，因为他们要对超自然的要求进行科学的探索，而最终没有任何实际发生的现象是超自然的。也许这种情形与一种含糊不清的失望感觉有关，我在阅读《怀疑的探询者》这本相当不错的杂志时，有时也有这种模糊的失望感觉。我感受到一种缺乏悬念的感觉。通常我在看到文章的名称时，就不打算去看文章的内容了，这就是说无论内容讲什么，这名称就不真实。这杂志讨论的任何内容，几乎都以贬低其价值作为结尾。更有甚者，许多作者似乎觉得他们必需把所有问题都解释得不留任何疑问，但这是不可能的，因为即使在真实世界里，对任何复杂事物的探索通常都会留下一些解释不清的东西。说真的，我很高兴看到诸如通灵外科手术和靠沉思冥想而漂浮起来这类东西被人们抛弃。但我也真的认为这个组织如果把他们的任务重新明确一下，一定会使这个组织和他们的杂志更有活力，更吸引人，同时也有更合适的基础。我相信这个组织的真正的使命是鼓励人们怀疑，科学地审查奇异现象的报导，特别是对那些对科学构成挑战的报导，更要谨慎地科学对待，但不要“超自然”这种标签，因为它暗示要贬低的东西却正是我们更需要的东西。很多这些现象最终被证明是虚假的，或者用最平淡无奇的解释就行了；当然也有少数现象可能被证明基本上是真实的，而且很有趣。超自然的概念对我来说不是一个有益的

概念；而且，贬低一切的精神，一方面在大部分情形下是合宜的，但另一方面它并不总是一种完全令人满意的探索方法。

我经常碰到这样一些情况，其中涉及有意识的欺诈行为，例如：轻信的人被骗去金钱，得重病的人转向骗人的毫无意义的治疗（例如通灵外科手术）而放弃可能有效的合理治疗，等等。在这些情形下，为了人类的利益，应该揭露这些欺骗行为。但是，即使如此，我们还是应该考虑到被骗人感情上的需要，这在庸医治病时常会遇到，受骗者常会感到满意，并不觉得是自我欺骗。

我要劝告怀疑者们应该从他们现在热衷的活动中，匀出一些精力去了解何以那么多人需要和少不了信仰。如果人们缺少接受新鲜事物的能力，新闻媒介就会发现强调所谓超自然是不合适的。事实上，这不仅仅是对多么好的证据的误解（这种证据使我们倾向于相信某种现象）。在我与人们讨论时，这些人相信在每天早餐前有6件不能做的事，就像《爱丽丝漫游镜中世界》一书中的白皇后一样，我发现这些人主要特征是把信仰同证据分离开来。事实上，许多这样的人坦率地承认，他们相信那些由于相信了而使他们感到好一些的东西。证据在这儿并不十分重要。他们利用证明规则性不在那儿而减轻对随机性的恐惧。

神经错乱和暗示感应性

在任何讨论奇怪的信仰时，有两个论题必须讨论，那就是神经错乱和暗示感应性。民意测验显示，在应答者当中有极惊人的百分比不仅仅相信“外来的飞碟”的存在，而且还希望被绑架以仔细审查飞碟，甚至还希望被性骚扰。当你和这些应答者打交道时，有理由认为这些人简直处于梦幻之中，分不清什么是现实，什么是梦想。人们自然会提出问题：这些人当中是不是有的在经受严重神经疾患的痛苦。

人们也可以设想，有许多相信这些不可思议事件的人，可能仅仅是有一种非常高度的敏感性，容易变得恍恍惚惚，这样他就

很容易进入和走出这种暗示感应状态。于是，当施催眠术的人使他失神时，就可以把这些不可思议的事件作为信仰强加于他；也许一种相关过程可以多少自发地产生。高度恍惚的敏感性可能具有一种潜在的能力，这也可以是一种有益的能力，因为它很容易使人被催眠，自我催眠，或进入深度冥思，从而使一个人达到有用的自我控制状态，这种状态用其他方法是很难（虽说不是不可能）达到的。

在很多有古老传统的社会中，有些人天生就十分敏感而常常进入恍惚状态，这种人常常担任祭司和预言家；而另一些则可能遭受某种不同程度的精神骚扰。这两类人可能比其他一些人更易于经历神秘的经验。在现代社会里，这两类人据说在有高度创造性的艺术家中时有发现。（当然，所有这些相关性必需作仔细的核实。）

现在已经开始研究那些智力上有独特特征的人，他们相信那些荒谬绝伦的不可能的现象，特别是其中有些人还声称他亲自卷入到这些现象中。但至今为止，几乎完全没有证据证明，这到底是严重的精神疾病，还是高度的敏感性。更有甚者，研究表明在很多情况下，一些用自然现象或用睡眠、药物感应精神状态即可作出的一般经验解释，高度的信仰可以施加影响。总之，这个研究课题还处于婴儿时期。对我来说，我希望对人类这些信仰和信仰系统以及目前还不清楚的原因，加大研究的强度，因为这个课题最终会对人类的未来起到非常重要的作用。

怀疑论和科学

部分原因为了研究信仰这个课题，也为了揭露欺骗行为和试图让媒介保持诚实，我们假定同意怀疑运动正在对神秘现象进行怀疑的、科学的考察，这些神秘现象似乎完全否定了科学规律。然后，假定怀疑论的等级恰好能驳斥所宣称的现象已转向被接受的定律。做到这一点必须十分小心。例如，在复杂领域里如气象

学以及行星科学（包括地质学），稀奇古怪的自然现象可能经常发生，它们可能与该领域里已被承认的某些原理发生矛盾，但并不违背自然界的基本定律，如能量守恒定律。在这些领域里的经验定律或现象学定律，有时很难与更基础科学的一些定律发生关联，而新的观测发现总是要求修正这些经验定律。一个被提出而未经证实的现象违反这些定律，并不会使人感到惊讶，不像违背能量守恒定律的现象让人们感到可疑。

仅仅在 30 年以前，大部分地质学家，包括加州理工学院几乎所有著名的地质学同事，还一直傲慢不恭地反对大陆漂移（continental drift）的思想。因为我那时经常与这些同事争论，所以我记得很清楚。不管有多少证据有利于大陆漂移说，他们就是不相信。他们从学习时得知，大陆漂移说是胡说八道，其主要原因是地质学界还没有为这种学说找到一个可以认为是合理的机制。但是，一种现象虽然还找不到合理的解释，却完全可以是真的。特别是在那些复杂领域里，仅仅因为专家不能很快想出发生的原因，就驳回未经证实但已发现的现象，这是不明智的。例如，在一两个世纪以前，行星科学家们犯了一个可笑的错误，他们极力嘲笑有什么陨石。他们说：“天上又没有岩石，怎么会落下岩石？”

今天，在我的朋友中（包括物理界的一些同事），在怀疑运动中有一种强烈的倾向，即太急于驳回别人的一些看法。例如有些人提出，当某些人在 60 赫兹交流电的较弱的电磁场影响下，一些稀有恶性肿瘤的发病率会提高。对此表示怀疑的人的想法可能是正确的，即这种效应是虚假而不真实的，但并不像怀疑者中的一些人说的那么明显。虽然场太微弱，以致不可能产生肉眼看得见的效应，例如温度的实质上的上升，但是磁场仍然可以对某些高度专门化的人体细胞产生非常微妙的效应，这些细胞对磁有异乎寻常的敏感，这是由于它们包含有可察觉量的磁铁矿成分。加州理工学院的克尔斯芬英（Joseph Kirschvink，加州理工学院一位非常有趣的教授）正在用实验研究上述效应的可能性。他发

现了一些初步的迹象，这些迹象表明磁场和这些罕见的恶性肿瘤的关系，很可能只是一种想入非非的空想。

球 状 闪 电

许多在大气层中发生的一些未能说明的现象，至今还残留在西印度群岛一种叫林勃（limbo）的特技舞蹈中。例如，kugelblitz——球状闪电就在这种舞蹈中有所表现。有些观察者声称他们在暴风雨天气时，看见高空的闪电像一种球形。它可以穿过篱笆很宽的空隙，或者可以穿窗入室，在室内到处滚动，然后又突然消失，留下轻微的烧痕。各种各样有趣的报导多得很，但是没有明确和无可辩驳的证据，也没有真正令人满意的理论来解释这种奇异的现象。有一位物理学家，阿尔瓦雷兹（Luis Alvarez），他猜想这种 kugelblitz 只是一种观察者眼球的反映。但这种解释和明确的事实不能很好地符合，例如，和一位科学家编纂的他与一个国家实验室的职员们的访问记就不能很好地符合。有些认真的科学家对这种现象进行了研究。当伟大的俄罗斯物理学家卡皮查（Pyotr L. Kapitsa）由于违抗斯大林的秘密警察头子贝利亚的指令，拒绝研制热核武器而被软禁在家时，他和他的一個儿子写了一篇有关球形闪电假想机制的理论文章。还有一些科学家也曾经试图在实验室复制这种球形闪电。但我应该指出，这些结果仍然是不确定的，不能让人们信服。简而言之，还没有人知道球形闪电是如何产生的。

1951 年左右，在普林斯顿高级研究所的一个研究班上，当有人提到球形闪电时，引起了一种混乱。当时，刘易斯（Harold W. Lewis，人们常称他“哈尔”， he 现在是加利福尼亚大学圣芭芭拉分校的物理学教授）提到了他和罗伯特·奥本海默（Robert Oppenheimer）共同研究的一项理论工作。我想，这是罗伯特在出任高级研究所主任之前最后的物理研究工作。当大家认真地听哈尔的讲述时，罗伯特显得十分焦急，这可能是因为他讲的研

究工作正是他、刘易斯和沃希森 (Wouthuysen) 对质子与质子在碰撞时产生介子的研究。在演讲结束后的讨论过程中, 有人提到恩里科·费米曾经提出一个模型, 在这个模型里两个质子由于还不清楚的原因粘在一起很长一段时间, 并在一种静止状态下发射介子。我们许多人加入了讨论, 猜想这种行为是什么原因引起的。著名的瑞士理论物理学家菲尔茨 (Markus Fierz) 突然插话说, 事物为什么粘在一起的原因并不总是清楚的。他说: “例如, kugelblitz, 球形闪电就至今也弄不清楚。” (奥本海默由于愤怒脸色开始发紫。这是他将发表的最后——篇论文, 但菲尔茨却用球形闪电转变了讨论的注意力。) 菲尔茨接着说, 他有一个朋友受雇于瑞士政府, 这朋友给他一个特别的铁路上用的卡, 使他可以在全国到处旅行, 以追踪球状闪电有趣的报导。最终, 罗伯特实在忍不住了, 低声咕哝说: “火球, 火球!” 从那时到今天, 我并不认为我们对于这一现象的认识有什么进步 (即使哈尔·刘易斯曾就球形闪电写了一篇有趣的文章)。

天空落下了鱼

关于神秘现象我最喜欢引用的例子, 是从天空落下鱼和青蛙。很多有关这方面的报告十分详细, 而且由可以信赖的观察者提供。下面的报告就是其中之一, 它由巴伊柯夫 (A. B. Bajkov) 提供, 描述了 1947 年 10 月 23 日发生在路易斯安那州马克斯菲尔 (Marksville) 的一次落鱼事件:

我现在为野生生物和渔业部负责生物研究。在 12 月 23 日早晨 7 点到 8 点之间, 有 2~9 英寸长的鱼落到街上和庭院里, 使城市南部的公民们大惑不解。当饭店服务员告诉我天上落下了鱼的时候, 我和我的妻子正在饭店吃早饭。我们立即收集了一些落下的鱼。城市的人们都非常激动。马克斯菲尔银行的经理巴赫姆 (J. M. Barham) 说, 他起床后发现他家和邻家约弗里昂 (J.

W. Joffrion) 夫人的院子里落下几百条鱼。这家银行的出纳员格里米里昂 (J. E. Gremillion) 和两位商人布兰查德 (E. A. Blanchard)、布鲁伊勒特 (J. M. Brouillette) 在他们于 7:45 上班时, 被落下的鱼击中……〔柯利斯 (William R. Corliss) 引自《科学》(Science) 109, 402, April 22, 1949〕。

所有与我讨论过的气象学家们都极力使我相信, 他们从事的科学不能提供任何明确的意见以否定这种可能性, 即由于气象的骚扰使这些动物上升到天空后, 又经相当长距离的转运, 最后落下来。虽然人们仅仅可以猜想有一种特别的机制, 如龙卷风, 完全可以使这种现象发生。

更有甚者, 如果鱼, 或至少是它们的卵在落下来时是活的, 那就会对动物地理学 (zoogeography, 研究动物物种的分布) 造成一种严重的争议。梅伊尔 (Ernst Mayr), 伟大的鸟类学家和动物地理学家, 在他的一篇论文中具体提到这种事件, 他指出, 如果这些动物能够被非常规的方法转运, 如像鱼从空中落下, 那么淡水鱼的分布中的许多谜, 就可能得以解释。

前面的讨论弄清楚了, 如果鱼真的是从天上落下来的, 那么, 它的过程一点也不会危及已被人们接受的科学定律, 事实上也许还会有益于这些定律。同样, 如果这些“隐生动物” (cryptozoological) 中的一种, 例如想像中的亚马逊森林巨大的地面生活的树獭, 被证明是真的, 这也可能不会危害科学的定律, 这正如 50 年以前在南非水中发现古代生物空棘鱼一样, 虽然人们曾认为这种鱼早已灭绝。但是, 有些未被证实的现象似乎向我们知道的科学基本定律发起了挑战, 我们又如何解释呢?

向已知科学定律挑战的未被证实的现象

虽然这些现象不能因为未被证实而认为它们不存在, 但必须对它们有高度的怀疑。不过, 如果它们中的一些被证明是真实

的，科学定律将进行修改，以包容这些现象。

我们现在来考查两个人之间的心灵感应术这一未经证实的现象（顺便说一下，我不相信这种现象），即两个血缘很近的人（如母与子或同卵双胞胎）之间可以出现心灵感应。几乎每一个听说过这种有趣故事的人都知道，其中一个人在非常紧张的一刹那，另一个人即使相距很远，也会立即惊叫起来。大部分类似这样的报导都伴有许多巧合事件，如选择的记忆（把那些毫无意义的惊呼忘记了），歪曲对环境的回忆（包括过分夸大同时性），等等。除此以外，要想科学地考查这些现象，在原则上不是不可能，但非常困难。例如，我们可以想像一个实验，这个实验有点残酷，因此从伦理学考虑将禁止这种实验，但用别的方法也不是不能实现。在这个实验里，可以雇用很多对同卵双胞胎，把他们分离开很远，然后使每一对中的一个非常紧张，再看另一个有什么反应。（有很多人易于受骗上当，包括埃斯彭《新时代》杂志社的许多熟人，他们相信这种实验可以用动物进行实际表演：把兔妈妈放到《鸚鵡螺》号潜艇之中，然后潜艇潜入极地冰层之下；兔妈妈的行为可以在潜艇里用监听器监听，当兔妈妈的一个兔宝宝在荷兰受到折磨时，兔妈妈会发出愤怒的信号！）

假定这样一种心灵感应（例如人类的同卵双胞胎）真的被证明是真实无误的，这与我的预料虽然相反，但基本的科学定律就必须进行深刻的改变；但毫无疑问的是，我们仍然可以找到一种解释。例如，理论物理学家可能最终还是要假定某种性质尚不清楚的限制，这种限制、束缚很可能导致对现在描述的物理学定律作重大修正。这样一种联系两个双胞胎的限制，可能在其中一个遇到严重麻烦时，会将信号传递给另一个。这种方式的效应可能与很多有趣的猜测一样，与距离多半没有关系。让我再次强调，我引用这个例子并非由于我相信心灵感应术，而仅仅是因为想借此说明科学理论如何有可能修正自己以容纳哪怕是非常不可思议的现象，这些现象初看起来不可能是真实的，但后来却证明的确真实无误。

一种真实的能力——从唱片的凹槽获知信息

有时候 CSICOP 发现,一种似乎是疯狂的说法被证明是正确的。这些案例在《怀疑的探询者》杂志上时有报导,在会议上也常有讨论,但我个人的意见认为,还应该引起更多的关注。现在十分清楚的是,我们的目的是把真实的断言从虚假的断言中区分出来,而不是简单地贬低这些断言。

从整体上说,科学家在调查可疑的欺骗者时,成功的记录少得可怜。有时甚至连很著名的学者都支持那些应该予以揭露的江湖骗子,这种情形实在太多见了。CSICOP 主要依靠一个叫兰迪 (James Randi) 的魔术家为那些声称有超常功能的人,设计了一些测试方法。兰迪知道如何欺骗观众,而且他也同样善于指出别人如何试图欺骗他。每当他揭穿别人的欺骗行为并指出他们如何取得诈骗效果时,他就十分兴奋、激动。

当有一个人声称他能从留声机唱片上的凹槽获知记录的信息时,这件事引起了《发现》(*Discover*)杂志社的注意。杂志社立即派兰迪去查明这件事。要考查的人是宾夕法尼亚的林特根博士 (Dr. Arthur Lintgen),他说他只要盯着一张灌满了后莫扎特 (post-Mozart) 经典交响乐的唱片,就可以知道作曲者、乐曲,有时还能知道表演的艺术家。兰迪对林特根博士进行了他通常使用的严格的测试,结果发现林特根博士的回答完全正确。这位医生正确地认出了两张不同的唱片,其中包括斯特拉芬斯基 (I. F. Stravinsky) 的《春的礼仪》(*Rite of Spring*),拉维尔 (M. J. Ravel) 的《西班牙舞曲》(*Bolero*),霍尔斯特 (Holst) 的《行星》(*Planets*) 和贝多芬的《第六交响乐》(*Sixth Symphony*)。兰迪按照常规又把另一些唱片作为对照物给林特根博士看。第一张, he 说是“含糊不清的讲话”,的确如此,是库柏 (Alice Cooper) 的讲话;第二张,他说“根本不是器乐,我猜想是独唱之类的东西”,结果这张唱片灌的是一个人的讲话,题目是“所以你想成为一个魔术师”。

这一古怪的能力后来被证明是真实的，也并不违背什么重要的原理。在唱片的凹槽中有必须的信息，问题在于人们是否能在审视中提取这些信息。兰迪证实，的确有人有这种能力。

第十九章 适应和不适应的图式

《怀疑的探询者》曾经成功地揭露了“第一百只猴子”这一虚构的故事。这个记事的前一部分是真实的。在日本一个岛上，一群猴子中的几个猴子学会了在岛四周的湖里洗净食物上的沙子。它们把这种技术传授给这群猴子中的其他一些猴子。到此为止，一切正常。但是《新时代》的一个神话故事中，却把偶然得知的这个故事继续往下推演，说当 100 个猴子学会洗去食物上的沙子这一技巧后，突然，由于一种神秘的手段，各地的猴子都知道了这种技巧，并开始应用它。到这儿，已没有任何可以信赖的证据了。

这个故事的真实部分本身就十分有趣，它是在动物中而不是在人类中进行学习行为的一个文化传播的例子。某种大山雀（与北美一种山雀有血缘关系的鸟）的行为提供了另一个例子，这种大山雀在几十年前居住在英国。这种小鸟学会了打开牛奶瓶。后来，越来越多的大山雀学会了这种技巧，甚至一些其他种属的鸟也学会了。这种由于需要而进行的体力活动已经成了这种鸟的传

统技能；它们所需要的仅仅是知道牛奶瓶里装有合适的回报。还有很多其他已知的例子表明，一些罕见的动物行为就是这样传播开来的。

文化的 DNA

人类文化的传播当然就更加复杂微妙。这其间的原因也许不仅仅由于人类卓越的智力，恐怕也与人类的语言有关，因为人类中的每一个都有任意复杂的语调。利用这种语言，人类社会显现出的群体学习（或群体适应，或文化进化）达到了一个相当高的水平，比起一群灵长类动物，或一群野狗、一群鸟，简直不可同日而语。这种集体行为可以简化到作为复杂适应系统的个体层次来进行分析，这种分析可以得到一些结果。但是，如通常情形一样，这种简化将会失去一些有价值的信息，而这种信息在按原来层次不作简化时本可获得的。特别是过分简单地简化到心理学层次，可能在除去人类个体一般特征之外，不足以显示在系统中出现的额外信息，包括特殊的传统、风俗习惯、法律和群体的神话等等。为了利用亨德森（Hazel Henderson）形象而生动的语汇，以上这些可以称之为“文化的 DNA”（cultural DNA）。这个词汇把许多代共享的经验压缩进去，并为社会构成图式，而社会自身也作为一个复杂适应系统而发挥作用。事实上，英国生物学家道金斯（Richard Dawkins）造了一个新的词汇“meme”，用来表示传播文化信息的单位，类似于生物进化中的 1 个基因（gene）。

适应至少具体发生在 3 个不同的层次上，因此有时在应用这个词时会引起混乱。首先，有些直接适应（direct adaption）是作为在一特定时期占优势的图式在操作时的一个结果而发生。当气候变得比较暖和、干燥时，一个社会集体可能会习惯地搬到高山上的新村子去；当然，也可能是为了求雨而举行宗教的祭典，在僧侣监督下搬到高山上。当领土被敌人侵占时，这个社会集体可能自动地退守到一个设防完备的城市，那儿有充足的粮食、饮用

水储备，可以长期抵抗敌人的围攻。当人们因日月蚀而惊恐时，祭司们已经准备好适当的咒语。但所有这些行为不会对当时占优势的图式有任何改变。

另一个层次涉及图式的改变。在不同图式的竞争中，一个图式的优或劣取决于现实世界选择压力的作用。如果在旱灾时祈雨的舞蹈不能缓解旱情，那么有关的僧侣、法师就会失宠，而新的宗教便会取而代之了。对气候变化的传统应对办法是向更高的地方移动，当这种图式起不了什么作用时，人们就会采取其他一些办法，如新的耕种方法或种植新的谷物。如果向森林撤退不能成功地对付敌人一系列的进攻，在下次敌人入侵时就会刺激被侵的一方派遣一支远征军进入敌人的腹地。

适应的第三个层次，是达尔文的“适者生存”（the survival of the fittest）。一个社会不能生存下去，也许就是因为它的图式不能应付各种事件这一简单的原因。这个社会中的不必都死掉，剩下的个体可以加入到其他社会集体中去，但原来的那个社会自身将消失，带着它的图式一起消失。于是，一种自然选择的形式在社会层次上发生了。

图式导致毁灭的例子并不难于找到。有些公社（communities，如古巴巴勒斯坦的苦修教派教徒和19世纪美国的震教徒）据说实行戒绝性行为。公社的所有成员（不仅是几个修士和修女）都被告诫禁止性活动。有了这样一个图式；要想使公社生存下来，只有改变死亡的数目，使生者多于死者。但这似乎又不可能发生。苦修教派已经消失了，震教徒亦所剩无几。不论怎么说，禁止性交往是一种文化特征，它是引起这些公社消亡和几近消亡的明显原因。中美洲热带森林中玛雅高级文明的突然消失是一个最惊人的例子，说明一种高级文化的消亡。如在本书开篇不久处所指出的，其消亡的原因直到今日仍在争论之中；考古学家不能确定是什么图式导致它们消亡，这涉及到社会的阶级斗争、丛林地带的农业、城市间的战斗或文明的其他方面。但是不论怎么说，据说仍然有很多人在玛雅文明崩溃后仍然在该地区残存着，

这些说玛雅语的人被认为是玛雅社会的后裔。森林城市中的石建筑走向了尽头，那些为纪念玛雅历法重要日期而竖起来的石柱，也同样如此。后续的社会比起这些经典时期的社会要简单得多，不再那么复杂。

一般说来，适应的三个层次发生在不同的时期。一种现存的占优势的图式可以在几天或几月之内，立即转入行动。虽然达到最高潮的事件可能突然出现，但图式的等级制度的革命一般说得很长一段时间。社会的消亡则将发生在更长的时间里。

在社会科学的理论讨论中，例如在考古学文献里，不同适应层次的区分并不总是十分清楚，经常彼此混淆不清。

人类语言的进化

语言的情形如同社会一样，在不同时期会发生不同的进化，或学习，或适应。如同我们前面讨论过的那样，一个儿童获得语言技能表示一个复杂适应系统在运作。在一个更长的时期里，语言经过几百年、几千年的进化，可以看成是另一个复杂适应系统。在几十万、几百万年的时期里，人类有了用现代模式的语言进行交流的能力。（所有这些语言都有某种共同特性，如长度随意的句子，精巧的文法结构，非常普适的文法特征如代名词、不同类所有格的结构，等等。）

当我们考虑文法进化时，重要的是要考虑到不同的适应层次。由于格林伯格（Joe Greenberg）开拓性的研究，有关语法的特征已积累了相当数量的信息，所有已知的语言都具有这些共同的特征（“语法的普适性” grammatical universals），而且这些特征几乎在所有情形下都可以应用（“语法的近普适性”， grammatical nearuniversals）。在解释这些一般特征时，人们显然必须注意被乔姆斯基（Noam Chomsky）和他的追随者们一再强调的约束，即与生物学有关的神经学预编程序的约束（neurologically preprogrammed constraints）。然而，人们还必须考虑成百上千年

语言进化的结果，这种进化又必需在某种程度上考虑到一些有利于交流的语法特征。最后，这儿也许有被冻结的偶然事件——“创建者效应”（founder effects），即所有现代使用的语言均源于古代语言（甚至一种单一语言）文法特征的选择，这种选择的结果一直到今天还保持着。（我们记得，在生物学中左旋和右旋分子的不对称性也是一种被冻结的偶然事件。）在圣菲研究所讨论语言学问题时，为解释语法的普适性和近普适性时，必须强调所有各方面起的作用都不可忽略。

在研究任何复杂适应系统的进化时，最重要的是要分清这3个问题：基本规则、被冻结的偶然事件以及对适应进行的选择。当然，当我们从宇宙时空尺度观察时，基本规则本身也可以看成是被冻结的偶然事件。

适应性以及什么是适应 或似乎是适性

在区分适应性的不同层次和不同的时间尺度时，仍然留下很多不解之谜，这些谜与为什么复杂适应系统像社会一样似乎总是与不善适应的图式紧紧连在一起有关。为什么它们不能只有越来越好的图式，和进步得越来越高级的适应？有些原因我们在前面的章节中提到过。

社会像其他复杂适应系统一样，经常受到选择的压力，而这并没有用适应性功能作具体描述。如我们所见到的一样，适应性并不简单地是某种东西的增加，即使它定义得很完善时也是如此。同样，在适应的特征和由于不同形式适应性引起的特征之间，也不存在简单的对应。这些问题并没有限制在社会问题上，在生物学中它们经常出现，有时在单个人的经验中也显得特别突出。是一些什么样的机制使得不适应的图式在经过磨难后仍然残留下来呢？

不适应的图式——外部选择压力

对明显不适应行为却能继续存在的一种非常普通的机制已经作过很长的讨论，特别是在迷信与科学的关系的那一章里。选择压力是促进还是遏止科学理论的发展，关键要看由此得到的理论在前后一致的解释中能否获得成功和正确地预言观测结果；至少也要看科学事业是否能够正常地运行。当科学事业运行不正常时，那是因为其他一些选择压力太强，其中有许多是源于科学家的人性弱点。

在迷信理论化的情形下，选择压力的非科学方面就会起支配作用。现在我们简要说明一下我们已经提到过的压力。这些压力包括维持有权力个体的权威，也包括维持社会的凝聚力，这对于社会进化有很大益处。另外，强加于人们的一种虚假秩序的结构和没有联系的随机事件的规律，可以给人们提供一定程度的安慰；对幻觉的认识（特别是能控制）可以减轻对不能控制事物的恐惧。与这些选择压力有关的是非常普遍的“利己图式”（selfish scheme）中的一种：任何复杂适应系统已进化到可以发现模式（pattern），而这些模式在某种意义上对它自己十分有利。

所有这些选择压力的共同要素是，对从科学进行考虑的适应来说，也就是说在成功地描述大自然时，这些选择压力大都是外在的。就正如在工程技术上的适应（即为人类某些目的而控制自然）一样，这些选择压力大都是外在的。虽然如此，这些选择压力在文化 DNA 的进化中，仍起了关键性作用。

显然，这儿有些普通的知识应该知道。我们一直在讨论的系统经常用这样一种方式定义：它们不是封闭的。非常重要的一些选择压力从外界作用于系统。一个简单的例子可以由人类语言进化过程得到。假定某些部落或土著人在相互接触时说一些彼此不同的语言，那么在几代人以后，某种语言在作了某些修改后保留下来，而其他的语言则逐渐消亡。消亡的语言主要地并不在于作

为交流手段的各种语言谁优谁劣，而更多地在于十分不同的原因，例如军事力量的强大或不同部落、土著文化的成就。这后者才是外部作用于语言领域的选择压力。

在生物进化的范畴里，选择一般发生在表型层次 (phenotypic level)，如我们以前讨论过的，也许是一些意料不到的原因直接作用于生殖细胞 (germ cells)：一个为精子所携带的“真正的利己基因” (truly selfish gene) 促使一个卵细胞成功地受精，即使那个基因对最后成长的机体可能毫无益处，甚至有害，事情仍然会这样发生。

所有这些例子使人们联想到，复杂适应系统中不适应图式的继续存在，其原因很可能简单地由于适应的选择判据太狭窄。即使所有选择压力都在起作用，仍然如此。

来自有影响个体的压力

在研究人类组织机构的进化时，如果只把组织机构的个体成员简单地视为同属的行为者，那并不总是有利的。常常有这样的事，特殊的个人作出的特殊决定使以后的历史大为改观。有时经过一个长时期后，这些个人行为的影响可能被证明是暂时的越轨，并经过长期的趋势把它“纠正过来”，但想否认、忽视个体的作用仍然是不可能的。于是，设计的要素进入了我们的思考范围。一个州或联邦的宪法是由个人执笔写出的。尽管在起草宪法的过程中矛盾重重，出现大量利益的竞争，但最终有效的和解还是达成了，并由某一位政治家缓缓向前推进。同样，一家商业公司是由某些个人指导的，老板或老板娘（有时还是其他某些个人）的性格和想法，是企业成败的关键。

同时，一个机构的行为在图式和选择压力的很多方面，类似一个复杂适应系统。一家公司常常根据某一整套常规、习惯和程序运转，给它的各个部门定下目标，为未来作出规划，为企业的有效运作培育思维模式。这些思维模式，加上目标、计划、

常规和程序，组成了图式，形成了直接压力作用到从老板到领班各种不同层次的管理人员身上。具体作用于真实世界里企业的选择压力，不论怎么说，都必须与利润、与市场里的生存相关；与顾客是否被吸引住和此后的满意相关。一般而言，当组织机构被认为像复杂适应系统，或被认为像训练个人管理技巧的场所时，有一个问题，即，决定组织机构生存的最重要的选择压力，和由个体管理人员施加的内部选择压力这两者之间的关系的问题就出现了。

美国统计学家德明（W. Edwards Deming，他还获得过物理学的哲学博士学位）在第二次世界大战以后，曾对日本工业的重建提出过一些忠告，结果由于他聪明的忠告，他在日本成了一位英雄。他最近以 93 岁的高龄去世，在去世前十多年他在美国也最终获得了荣誉；现在，他的思想已被许多工业企业接受。他最有名的思想也许就是他强调“总体质量管理”（total quality management，缩写为 TQM）。TQM 有许多方面，但最有用的是他对由管理人员（包括中层管理人员）施加的内部压力特别苛求。正是这些管理人员决定报酬和处罚，能促使职员们按一种特殊的方法显示出积极性，因此这些人直接影响到组织机构的主要图式。但这些直接的影响能和真实世界中的选择压力和谐一致吗？职员们由于他们的积极性而使顾客满意得到了奖赏没有？或者顾客们满意仅仅只是管理人员的想入非非？管理人员的行为偏向于像真正的利己基因，行动的直接目的在一定程度上只是为了图式的生存，而也许并不利于机体的生存？

\\

循环中有人的适应系统

一个企业里管理人员的例子，说明了适应系统里有一个或更多人在循环内的更普遍的情形——这时系统经受一种有时称之为直接进化的作用，这时选择压力将由个人施加给系统。

直接适应（direct adaptation）最简单的情形，是没有不同的

图式。我们来看一看验光医生检查眼睛视力的情形。你用一只眼盯着一张图，上面横排、竖排都是一些字母。验光医生向你提出一序列双重选择的问题：在每一对图像中，是左边的还是右边的一个更清晰一些？用不了多长时间，你就会得到正确的诊断结论，知道被检查的那只眼睛是散光、近视还是远视。单独一个视力表的图示，它可以使自己适应于你的眼睛。

一个人在循环中的另一个不太乏味的例子由西姆斯（Karl Sims）的工作提供。西姆斯的工作现在已由思维机器公司继续，这家公司设计和生产并行处理计算机（parallel processing computers）。西姆斯利用一个有 256×256 像素的计算机显示屏，每一个像素的颜色可以在整个光谱上变化。图形的形成由每个像素的颜色特殊组合而成。利用西姆斯的方案，计算机利用一种特殊的算法从一种特定的图形开始，而后产生一系列各不相同的图形。“在循环中”的人，选择对他或她看来最好的变动。然后计算机又提供另一套选择，如此不断进行下去。不用很久，这个系统就会集中到一个图形上，这种过程显示出人涉及到选择之中。人们告诉我，其结果非常令人注目，而且参与这种过程是非常吸引人的。

我们可以想像在这种方法的精心制作中，机遇在估计选择的算法中起了作用，而这些选择在每一阶段都会出现。或者，在非常相近的情形下，计算机可以作为算法的一部分从事一种伪随机过程（pseudo-random process）。

在圣菲研究所召开的一次全体委员会议上，兰顿（Chris Langton）对西姆斯的工作作了一个简要的描述。史密松研究所（Smithsonian Institution）的秘书、考古学家亚当斯（Bob Adams）提出，算法自身就要受变动的支配，而这算法又控制计算机不断提供的各种选择的方式。如果真是如此，它将变成一种图式，这种图式的每一个变体可以看成是一种不同的探索过程，在这过程中要通过长长一系列可能图形中追索、被选取的特殊过程（它可能或不可能包括一种基本的机遇），与被人作出选择引

起的后果一起，将决定计算机显示屏上的图形。

这些图形以后可能会变成一种恒定的中介物，并受选择压力的支配，例如市场中的推销或评论家的评论。计算机的方案（通过人这一主体）通常使我们得到较高的价格或较有利的评论，这种图形得到促进，而其他图形则受到贬谪。同样，人的兴趣、感受（有意识或无意识的）都可能在价格或评论的影响下发生变化。方案、计算机、主体的人，以及市场或评论家，形成了一个复杂适应系统，而人处于这个循环之中。事实上，这样一个系统可以作为一种未经加工的漫画，表现出真正的艺术家的创造过程如何在运作。

另有一种复杂适应系统我们都十分熟悉，那就是人为自身目的而培育动植物。培育动植物，在现代生物学历史上扮演了一个重要的角色。达尔文在他的《物种起源》一书中，在红色标题“人工选择”（artificial selection）一节中反复论及这一内容，而且用它与自然选择（natural selection）进行比较对照。孟德尔（Gregor Mendel）基因定律就是在培育豌豆的过程中，由修道士孟德尔发现的。在19和20世纪之交，当孟德尔的研究成果被再次发现和广为人知时，丹麦人德·福里斯（de Vries）在培育郁金香时发现了突变（mutation）。

培育者在他培育的生物中，仅选择其中的一些继续培育，他们正是靠这种方法将选择压力作用于生物。当然啦，自然选择也在同时起作用，还有许多动物和植物不能继续生存或繁殖下去，其原因和培育者的决定毫无关系。在生物进化中，基因组通常是一种图式，但是这儿的进化部分是直接的，而培育者的原则也会形成一种图式，虽然是另一种图式。

当一位马的饲养员要将一匹马出售或者让它去进行比赛（或两者兼而有之），那么他的方法就与卡尔·西姆斯的计算机方案加上主体人的选择类似，他将受到市场和赛马场的选择压力。于是，一个带有部分直接进化的复杂适应系统，可以部分地成为一个有序程度较高的复杂适应系统，在这个系统里人类控制、校正

的性质可以由它自身进入系统。

但是，假定一个富有的业余饲养员并不在乎他养的马在赛马场上的表现，或者不在乎谁想买他的马，那么，在有序性较高的复杂适应系统的情形下，饲养马的方法所导致的结果很可能不适应市场或赛马场的需要。正如管理人员行为的动机不在于吸引或保有顾客，这一位业余饲养马的人只是为了使自己高兴，并不按照商人的准则做事。从纯商业观点看，饲养是失败的，但却仍可继续下去。

不适应图式的持续性：成熟的窗口

不适应的图式有时能持续下去，是因为有关的适应性中止了，或近于中止。年幼的儿童与他们生活中一些重要的人，形成各种关系：双亲、继父或继母、兄弟或姊妹、奶妈、妈妈的男朋友，等等，等等。按照霍洛威兹（Mardi Horowitz）的观点，儿童在这样一种关系中的态度和行为，由一种“个人图式”（person schema）控制，这种图式与儿童对所提到的个体的理解、感受有关。开始，这样一个图式还在变化之中，但到了儿童时期的后期，它就会抵制变化。在儿童成长的时期，这些个人图式可能深刻地影响他或她与其他人相处的关系。例如我们都熟悉，有些成人在儿童时期只有一个亲人（父亲或母亲）时，当他成年后会不断用不同的代用人物来填补那个空缺了的位置。个人图式常常是非常缺乏适应性的，在这种情形下长大的人常常会神经过敏，而且众所周知很难治愈。

用术语“成熟的窗口”（windows of maturation）和“可塑性”来考查上述情形，十分有益。成熟窗口极端的例子是铭记*这一现象。在洛伦兹（Konard Lorentz）的书《所罗门王的环》（*King Solomon's Ring*）中，对铭记作了充分描述，并因此为世

* 铭记（imprinting）为动物早期就起作用的一种学习机制——译者注

人知晓。一只刚生下来的灰色的鹅会把首先认为合宜的动物看成是它的双亲，并总是跟着它，在它的周围不愿离开。如果这个合宜的动物是洛伦兹或者是另一个人，那么这只鹅在某种意义上就会认为自己也是一个人，而它作为一个正常鹅生活的能力就永远地受到损害。成熟的窗口是生下来以后很短的一段时期，在这段时期里小鹅辨认它的“母亲”，过了这段时期辨认已经固定了。大多数小鹅在早期看见它的真正的母亲，那么铭记的遗传程序就表型地成功了。对少数小鹅来说，它把一位生态学研究者（如洛伦兹）当作它的母亲，遗传程序就明显地失去作用。在这样的情形下，由铭记提供的学习图式就不适合于这位特殊的个体了。由于这种学习图式对大部分个体有良好的结果，因此导致铭记的遗传图式在生物进化时就没有被消除。还有，遗传图式提供的这种成熟窗口，必需为生存提供某种共同的利益。估计这种利益来自于这种可能性，即当窗口关闭时，这种可能性将转而去寻求某种新的信息。

成熟的窗口对人类起的作用也早为人知。例如，有些婴儿一生下来视力就有问题，如果有可能恢复就应尽可能早地矫正（至少不要让尚未发现的新问题介入）。在其他情形下，窗口还可以说不那么绝对。在襁褓和儿童早期这一关键时期，如果对已出现的损害不予矫正，则各种忽略形式所造成的后果可能十分严重；但在适当的条件下，恢复的可能性很大。这些可能性在可塑性处作过讨论，神经系统改组自己的能力使模式在作过长期抵制后，最终还是要改变。

一个重要的公共政策的结果，尤其是在美国，涉及的范围是在两岁半以前所需的学习能力如果有缺陷，则可以根据“抢先”（Head Start）之类的方案进行补救，这些补救可以在接下来的两年半或更长的时间内给儿童以特殊的帮助。有些研究人员指出，成熟的早期窗口在这儿起了重要作用；如不在婴儿时期改善婴儿的学习环境，过了这段年龄的补救方案，从长远观点来看，就不那么有效了。另外一些研究人员则指出，事实已经证明，“抢先”

方案如果在力度和时间上得以充分实施，那么在这种情形下就可以有足够的可塑性，使学习缺陷得到本质上和持续很长时期的矫正。

这种关于少儿时期学习缺陷的争论，无论其功绩如何，有一点是十分清楚的，在生命的早期获得第一语言是十分关键的。有少数几个已知的案例指出，由于儿童时期很少或根本没有与人类语言接触，结果天生具有的掌握一种语言语法的机能，不再起作用。显然，这与真实的成熟窗口有关系。

不适应图式的持续：时间尺度

不适应图式存在的最普通（也许是最简单）的理由之一，是它们曾经是适应的，但原来已适应的条件现在不占优势了。复杂适应系统的环境改变的速率快于进化过程，于是两者不相配套。（成熟的窗口在某种意义上是这种时间尺度不匹配的一个极端的例子。）

在人类思维领域里经常出现这样一种情形，情况的迅速变化超过了我们思维模式变化的能力，使思维模式落在后面。泽西岛（island of Jersey）动物园的创始人丢勒尔（Gerald Durrell）曾在多次探险中带回一些稀有动物，对此他还写了许多本富有魅力的书。他还详细叙述过一次经历，那是他用手抓住了一种西非的蛇。因为他“知道”那条蛇是一种无害的瞎眼蛇（像欧洲的无脚蜥蜴），所以没有作任何预防准备。突然，那条蛇张开了眼，但丢勒尔没有及时反应过来，没有从眼睁开这一新的信息想到这蛇是一种还不知道的而且很可能危险的蛇种。结果这条蛇果然有毒，丢勒尔被咬了一口，还差一点丢了命。

我们总是试图抓住我们的图式紧紧不放，甚至歪曲新的信息以适合我们的图式，而不是去改变我们的思想方式。很多年以前，有两位与埃斯彭物理中心有联系的物理学家在 Marron Bells Wilderness 爬山，当他们下山时迷失了方向，从山的南面而不是

靠近埃斯彭的北面向山下走。他们向山下看，以为山下面的湖就是刻瑞特湖（Crater Lake），从这个湖他们可以认出回家的路。他们两人中的一个说，这个湖的边上有一个码头，而刻瑞特湖并没有。另一个物理学家回答说：“那一定是我们早晨离开后建造的。”勿需多说，一个失败图式绝望的防御最终总是错误的。这两位物理学家看到的是山另一边的阿瓦朗泽湖（Avalanche Lake），结果他们在两天后才回到家。

再拿那条蛇来说，既然知道那条蛇实际上并不瞎，那么根据我们熟悉的创造性思想，就应该知道那条蛇很可能有毒，这样，我们就会从一个吸引域逃到另一个域。湖的情形也一样，既然山下的湖有码头，因此不像刻瑞特湖，那么就应该另寻道路。现在我们的讨论要强调的是：获得这些思想的过程，在很多情形下可能与他们的需要不能齐头并进。

众所周知，各个商业公司在判断变化的市场条件以便迅速跟上这种变化时，常常顾此失彼。在当今美国，减少战备经费意味着那些迄今主要为防卫而进行生产的工厂，应立即转为民用生产。这些公司由于几十年都与军事部门和相关的政府代理机构打交道，所以他们关于市场的认识就常常受到这种经历的制约。在与军事部门打交道时，出售一种产品也许只需与海军上将共进午餐就行了，而不必像民用商业的竞争那样精心策划。更有甚者，改变这些图式的机制和回应选择压力，常需几年的运作，然而与防御有关系统的需求却可能在一两年内急剧减少。如果管理人员（或者替代的新管理人员）不引入一种新的机制，以便能够更快对市场需求作出反应，那么他们公司的前景就不会光明。

当环境的变化快于一种进化过程而使后者不能与之适应，这是一种挑战。这种挑战将深刻影响到生物圈和作为一个整体的人类。人类文化的进化，特别是通过技术领域的进步，使得人类有可能在很短的时期里使人口急剧膨胀，也使得每个人对其他人和对环境产生不利影响的能力大大增强。人体和其他有机体的生物进化，没有可能跟上文化的进化。我们人类自身的遗传图式大部

分还反映 50000 年以前的世界，不可能通过正常的生物进化机制在仅仅几个世纪里作出重要的改变。同样，其他有机体和整个生态群落也不可能迅速变化以适应人类文化引起的改变。

这就意味着，用以对付由强有力的技术武装起来的巨大人口数量所带来的结果，文化变化自身是唯一的希望。如果人类想聪明地对待自己的能力，那么合作（健康的竞争除外）和深谋远虑这两者都是当前最迫切需要的，可以说已经到了刻不容缓的地步。如果信任已经建立起来，那么在处理一些最紧迫的事情，如利用遗传和其他工程的未来进展进行人类或其他有机体的人工改变时，合作和深谋远虑则更加紧要。

当人类面临无数盘根错节事件显示出的巨大复杂性时，深谋远虑要求我们具有以下各种能力：认知和收集大量有关的信息；迅速利用由分枝的可供选择的未来历史所提供的信息；以及聪明地选择简单和相似的信息，以便不必牺牲那些有重要价值的成果。功率巨大的计算机在预测未来将起到重要的本质上的作用，但是我们不能允许它们把对问题的详细叙述，以牺牲其重要性为代价，而偏向于可定量和可分析。

在这一点上，我们简略地了解一下计算机对复杂问题能够提供的简化模型，是十分适宜的。像复杂适应系统运作的计算机可以在以下两方面为我们尽力：它们自己可以学习或适应；它们可以模仿或模拟真实世界，这个世界正是它们要学习，或适应，或涉入的世界。

第二十章 学习或模拟学习的机器

计算机可以像复杂适应系统那样发挥作用。可以将硬件设计得能完成这些作用，也可以为有普通硬件的计算机编制学习（或适应、涉及）的程序。到目前为止，大部分这些设计或程序还得依靠模拟一个简化的图像，这是某些有生命的复杂适应系统如何工作的图像。

神经网络计算

一个计算机复杂适应系统的人所共知的典型例子是神经网络，它可以实施软件或硬件的功能。我们设计一个大致上的模型，看哺乳动物（尤其是人）的大脑将如何运作。我们从许多组的结（nodes）或单元开始，这些结或单元通常称之为神经元，不过我们对大脑中个体的神经元到底对应于什么，还远没有弄清楚。每一个单元用比特来描述每一时间瞬间的特性，1个比特（0或1）是用来指出“神经元”是触发了还是没有。每一个单元

都与其他某些或所有单元有关联，而任何单元对任何其他单元的影响的强度可以是正，也可以是负，这决定于这两个单元的运作。如果第一个单元激发了第二个，就是正；如果抑制了，就是负。在学习过程中，这些影响的强度不断地在变化。

神经网络计算可以在一般的计算机上实现。在这种情形下，单元和单元对其他单元的刺激或抑制效应，由软件负责。这时单元仅仅作为计算的元素而存在。为实现网络，也可以利用特殊的计算机硬件，这时网络将由分离的计算单元组成，而这些单元则按并行处理格式（parallel processing format）安排。

有许多问题已开始由神经网络计算来处理了，其中一个例子是学习用正确发音来大声朗读英语课本。因为英语拼音常常不按语音学规则，这是众所周知的，因此大声朗读的练习十分重要。计算机发现了大量的通用规则和一些意外的情形，这些意料之外的情形可以看成是特殊的附加规则。花了足够的时间和朗读了足够的课本之后，不仅那些通用规则而且那些特殊的规则都会呈现出规律性。利用神经网络来学习大声朗读英语，必须发挥它作为一个复杂适应系统的作用。还必须在一批教材中，对各种规律性东西进行各种试验性识别，把有关规律性的信息压缩成图式，然后把这些图式用于更多的教材，让它们与其他图式进行竞争，以便尽可能得到正确的发音。这种学习称之为有监督式学习（supervised learning），它与另一种发音图式不同，这后一种图式是用英语讲话给计算机听，看它们能不能听懂。但这种图式并不为人们提供有用的正确答案。而有监督的学习则根据一种教材正确的发音与根据图式得到的发音之间的大量差异，指出什么是合适的发音。

在 NET（网络）对话时，正如赛伊洛夫斯基（Terrence Sejnowski）和罗森伯格（C. R. Rosenberg）在 1987 年改进的那样，输入数据由 7 个连续的字符组成（每一个字符可以是 26 个字母中的一个，或者是一个空格、一个逗号，也或者是一个句号），这些字符根据某本书面英语教材（written English text）确

定。然后在一个移动窗口显示，并逐步对整个段落进行扫描。输出则是七个字符中间那个字符的发音编码；这个编码馈入一个语言发生器。

输入与附有一组 $7 \times 29 (= 203)$ 单元的比特是一致的，而输出则与 26 个其他单元有关的比特相一致。还有 80 个附加单元帮助学习。这个图式用几组相互作用强度来描述，这儿的相互作用限制在输入单元作用在辅助单元上的效应，和辅助单元作用在输出单元的效应上。所有其他相互作用强度选定为零，恰恰只需保持过程易于管理就行了。

网络要被调试成可以利用 1024 个单词组成的字符，伴以“教师”（这教师是对所有字符编码后的序列）给出教材上的正确的英语发音。

在首次调试操作时，要把整个教材过一次，强度从任意值开始，然后当 7 字母窗口的中心一个字母跟随一个字母地扫过整个教材，在这过程中改变强度（利用一种专门知识）。在每一步中，输入和强度必须馈入一个简单的公式，这公式可以指出试发语音的候选输出值。在正确发音和候选输出之间的差异就被减化到利用一个相关的简单公式来修正其强度。首次调试操作结束时的强度，被作为用同样 1024 单词作第二次调试操作的初始强度。以后照此调试下去。

调试成功意味着在最类似正确发音值附近，强度只有小小的偏离，而不会有太大的涨落。如果 1024 个单词在 10 次调试操作后就能清晰地讲话，那么在 50 次调试操作后，其发音的精确性估计可达 95% 的水平。在调试之后，最终的强度可以用于读其他一些教材，而且用不着再教。清晰地讲话，其精确程度已达到 78% 了。

神经网络的复制程序还多得很，它们可以用来解决许许多多的问题，而且通常都取得相当的成功。这些图式常常用一组相互作用强度来描述，每一种描述都描述了一个单元作用于其他单元的效应。我的一位加州理工学院的同事霍普菲尔德（John Hop-

field) 在 1982 年指出一种情形, 如果人为地对这些强度施加影响, 那就不仅允许明确界定的适应性, 而且在学习过程中还会不断增加适应性。我们要求任意单元 A 作用到另外一个单元 B 的强度, 与 B 作用于 A 的强度相同。这种情形对真正的大脑来说, 几乎肯定是不现实的, 并且也违背了许多成功的神经网络的情形, 包括 NET 对话。但是, 这种情形很有启发意义, 的确在有些情形中, 适应性既可明确界定又可不断增加, 而在其他情形下不能如此。

如通常的情形一样, 当明确界定适应性这个概念以后, 学习过程就是在一个适应性景观中探索一个凹部的过程。如果适应性还在不断地增加, 则高度不断降低, 这样, 就会常常出现这样的问题, 适应性将落进深谷旁边的浅洼里, 但是可以由引入噪音而得到改善。以上情形可以用轻微改变强度来实现, 改变要经常随机地进行。当人们想寻求创造性思想时, 这些在图式之内的随机变化类似于那些让人们慢慢走出思想常规的建议。如通常情形一样, 这儿有一个噪音的最佳水平。

作为一个复杂适应系统的遗传算法

既然神经网络是以大致上与较高级动物的学习类似的情形为基础, 人们可能会问: 以计算机为基础的复杂适应系统, 能不能被看作是一种与生物进化的近似呢? 密执安大学的霍兰德 (John Holland) 在这方面作了开拓性研究, 他还是圣菲研究所的主要支持者。这个系统利用了“遗传算法” (genetic algorithm, 这是一种特殊的“分类器系统”) 软件和传统的计算机硬件。至今为止, 这个系统大部分被用来解决那些适应性已被明确界定的问题, 例如为西洋跳棋获胜制定策略, 或为最便宜价格设置线路系统等等。不过, 我们没有理由认为这些系统不能用于其他种类的问题。

对遗传算法软件可以用一种高度简化的描述。每一种图式对

一个候选策略或方法，都是一个计算机程序。每一个这样的程序都是由许多计算机指令组成。图式的改变由这些指令的改变来完成，举例说，有两个指令像图 20—1 所示，正经历一种交叠过程，这种过程在生物的有性繁殖中可以出现。这两个指令在某一点都可以分成一个开始或者一个结尾这样的两部分。交叠 (crossing-over) 则引起两个新指令的产生。其中一个新指令由第一个旧指令的开始部分和第二个旧指令的结尾部分组成；另一个新指令则由第二个旧指令的开始部分和第一个旧指令的结尾部分组成。

用新指令代替一个或多个指令的办法修改一个计算机程序，有时可以改进指令的适应性，但有时也会削弱其适应性。要想判断每种修正的价值，只有将不同的程序在要解决的问题上进行实

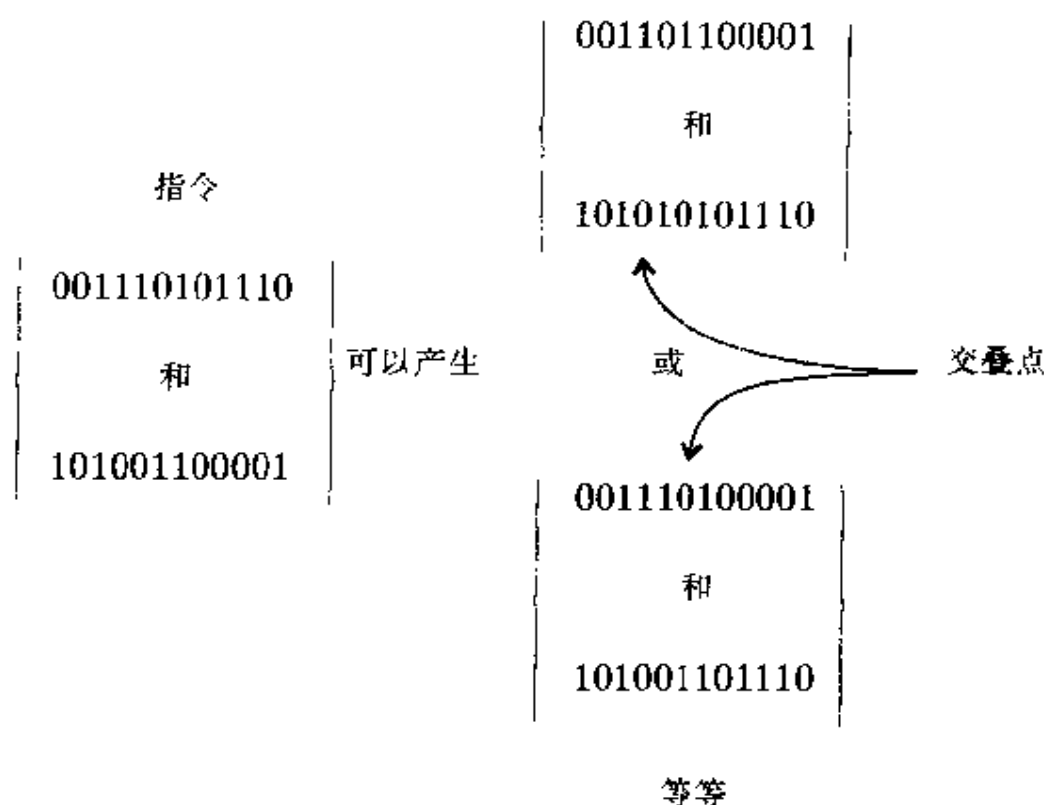


图 20—1 计算机指令的交叠

验才行。(所谓“信用测试”(credit assignment)就是要作出这种困难的判断。)约翰·霍兰德的分类器系统提供了一种市场,其中竞争指令是买和卖。那些可以记录改进程序性能系统,比起那些性能没有改进或更差一些的系统,其价格应该要高一些。在前者的情形下,系统具有有序指令表。新的指令不断地进入,而指令表底端的一些指令被删除,为新指令留下空地方。指令表顶部的一些指令用于修正了的程序,这些程序构成变化了的图式。

这仅仅是对于一个十分复杂的过程最粗略的草图。即使如此,十分清楚的是,程序逐渐成为一个结果,而适应性则在进化过程中有增加的趋势。一个程序的性能所具有的反馈不是一个刻板的规则,但是一般说均有受市场条件影响的趋势。因此,在系统中有足够的噪音允许逃离较小的适应域,于是附近的深度可以被查明。具有一般性的是,这系统探寻出一个巨大的可能方法或策略的空间,而并不达到一个稳定的状态——一种绝对的最佳状态。例如在下棋时,最佳策略至今仍未发现。但是,如果我们下的是三连棋,那么,机器将很快发现最佳下棋的路数,而探寻也就此结束。

虽然遗传算法一直主要用来探寻最优化问题,其中适应性(或“支付”(payoff))已被很好地界定,但它也可以用于其他情形,正如神经网络可以用于两种情形一样。神经网络和遗传算法两者都可给出以计算机为基础的复杂适应系统,它可以在没有人设计的情形下改变策略。人们自然会问,这两类技术是不是有任何特别之处?它们似乎与大脑和生物进化功能有些不太明确的相似之处。我们能不能发明另一类系统,其基础类似于哺乳动物的免疫系统?是不是在事实上有许多明确界定的以计算机为基础的复杂适应系统,其中包括那些已知的或假想的和许多其他的系统?我们能用实用的术语来描述这么多种的系统,以便让潜在的用户能通过各种可能的以计算机为基础的系统,发现适合于他或她的问题的系统?

这些问题是研究以计算机为基础的复杂适应系统的学者们极

力试图回答的问题之一。

复杂适应系统的模拟

与复杂适应系统有关的计算机决不仅仅用来改进各种解决问题的硬件或软件，它的另一些广泛的应用是模拟复杂适应系统的行为。

这些模拟的最令人惊讶的特性，是由一些简单的规则产生复杂的行为。这些规则意味着一般的规律性，但在个别案例实施的结果中，却呈现出另外一些特殊的规律性。这种情形有些类似整个宇宙，它由一些简单的规则支配，却允许无限多的剧情出现，每一种剧情都呈现出它自身的规律性，特别是在一给定的空间和时期。于是，随着时间的逝去，出现了越来越复杂的形式。

设计一种易于操纵的模拟的窍门是删掉一些规则，使规则显得更加简单；但在删减过程中要留下那些最令人感兴趣的突然出现的行为（emergent behavior）。模拟设计者因此必须知道许多有关以下的情形，即按规则的变化却会有产生极不相同剧情行为的功效。有些设计者，例如密执安大学政治学的科学家罗伯特·阿克色诺德（Robert Axelrod）发现了一种敏锐的直觉，它可以帮助设计者们去猜想如何简化规则，但又不至于泼洗澡水时把小孩也泼出去了。显然，这种直觉的获得部分是基于先验的推论，部分是基于经验，这种经验的获得是由于经常摆弄规则并观察在规则修改后使特定的计算机运行发生什么改变。但是，简单模拟的设计带来许多有趣的结果，这更多的是在艺术方面而不在科学方面。

那么，这些规则的研究和研究的结果能够使模拟更科学化吗？除了对什么样的规则导致什么样的行为的鼓舞人心的经验猜测进行详细描述以外，还需要附加的经验。然后，对精确的定理作一些可能的推测，最后，这些定理中的一部分可能被证实，证实的人估计是数学家。

在上述情形下，一种科学的规则和结果可能会出现，在这过程中计算机运行发挥了实验的功能，而推测与证实定理则组成了理论的实体。事实上，随着迅速和功能更强的计算机的出现，越来越简单的模拟正在越来越多的课题上得到应用。对未来科学所必需的原始资料，已正在积累之中。

最后，至关紧要的是模拟与它们模仿的真实世界之间的关系。模拟真能为真实情形提供有价值的直觉吗？它们关于真实情形的推测能为观测所证实？它们能够揭示以前没想到过的可能行为吗？它们能对已知现象指出新的可能的解释吗？

在大多数场合，模拟还仍然太不成熟，无法确切回答上述一些问题。尽管如此，令人惊奇的是在某些情形下，一些非常简单的规则可以洞察真实世界的一个复杂适应系统的运作。

一种生物进化的模拟

一个杰出的、现在非常著名的例子是 TIERRA 程序，它是由德拉威尔大学 (University of Delaware) 和圣菲研究所的托玛斯·雷 (Thomas Ray) 制定的。他是一位生态学家，工作在哥斯达黎加低地雨林一个称为拉塞尔瓦 (La Selva) 的生物研究站。生态学研究之所以吸引了他，是因为他想研究进化。不幸的是，在人的一生中看不到什么生物进化在发生，因此他发现他的工作在遭受挫折。他决定在计算机上模拟进化。

他打算分阶段制订一个合适的程序，开始是一个高度简化的程序，然后逐渐加入更多的特征，如中断平衡或寄生现象的存在等等。他告诫自己，要细心地用“机器语言”(machine language)制订一个程序，他后来制订出一个功能单一的、非常简单的程序，并作了调试。这个最初的程序就是 TIERRA，后来这个程序被逐渐改善，现在它的功能已异乎寻常地齐全。这个程序在反复运行的过程中，找出每次运行出现的问题，这使得整个程序被占满了。而且，有许多特征原是他准备以后加进去的(如中断平衡和普遍的寄

生现象),现在却由 TIERRA 自身显示出来。

TIERRA 利用“数字结构”(digital organisms),这种结构是机器指令为争得计算机记忆的空间和中央处理机*的时间而得到的结果。由 TIERRA 给出的复杂适应系统的共同性,在某种意义上是退化的,因为每一种数字结构的基因型和表型都表现了相同的客体,即指令的序列。这种序列经受着某种突变,也受真实世界选择压力的作用。不过,当考虑到系统时,把两种功能分开是一种好的想法(如瓦尔特·冯塔纳所强调的那样),即使这二者被同一实体完成,也仍然以分离为好。(按照地球上生命起源的某些理论,这种过程的早期阶段也有相同的退化特性,其中核糖核酸(RNA)扮演了基因型和表型两种角色。)

突变有两种方法引入。第一,信息量比特不时地在整个结构的任何地方随机(从0到1或相反)交换(非常像真实的结构受到宇宙射线的影响)。其交换比率大约是1个比特,交换时有1万个指令被执行。第二,在数字结构重复的过程中,比特在复制品中随机地交换。这时的比率要高一些,大约为1个比特的交换时有两千个指令被复制。这是平均比率,错误被不规则地调节得足以避免周期效应。

在生物中死亡的重要性没有被 TIERRA 的设计所忽略。记忆空间被严格限制,在缺乏死亡的情形下,自重复的造物就会立即把它填满。因此“收割者”(reaper)将会按照结构的年龄以及在执行某些指令时犯的误差,根据一定的规则消灭掉这些结构。

托玛斯·雷设计了一个有80个指令的自重复序列,它常常被当作 TIERRA 的前身——初始数据结构——在任何运作中使用。当他第一次让这系统运转时,他原以为会出现一种长周期的故障和故障检修。但并没出现他预料的情形,相反,有趣的结果立即出现,许多结果对真实的生物进化颇有启发性,并且从此以

* 中央处理机 (central processing unit) 用来自重复——译者注

后这种启示越来越有价值，并广为应用。

经过一个长期进化后，出现了令人极感兴趣的改进，出现了一种对原型改进了的复制程序。它只有 36 个指令而不是 80 个，而且还可以用它完成更复杂的计算。当托玛斯把这种压缩技巧表演给一位计算机科学家时，他被告知这是一种称为“展开环路”(unrolling the loop)的已知技术的一个例子。在 TIERRA 里，进化曾指出如何展开这个环路。托玛斯写道：“这种优化技术是人类发明的一种非常聪明的技术。但它用一种混合型而非功能型来实现，因而没有人使用（除非中毒十分严重）。”

那么，这种不同于 80 个指令的结构是怎样兴起的呢？突变不可能直接地产生这种结构。开始，这系统只包含原型和它的有 80 个指令的下一代。（下一代倍增到记忆接近填满；这时收割者开始工作。变化的结构总数继续占据大部分记忆。）最后，突变出现了，以一种特别的方式改变了一个有 80 个指令结构的表型：当结构审查自己以决定它的规模，使它能将这种规模传给它的下一代时，答案出现错误，一个新的规模传给了下一代。这样，结构的总数就会包括许多不同规模的结构。

如果一开始试图用这种方式模拟生物进化就产生这样多的洞见，那一定会有大量的领域等待我们去探索。模拟如何进化的新方式运转了大量时间以后，产生了现在储存在结构里的信息，而且遍及世界的天然群体，可能不仅有助于了解现存的多多样性，而且还可以更好地保护这种多样性。

讲授进化的一种工具

TIERRA 和有关生物进化的计算机模拟技术在未来的发展，能把一种如何进化的感性知识传递给非科学家的人，因而具有特殊的价值。大部分人发现它很容易被理解，即使没有计算机模拟，只需把比较少的变化与少数几代的选择联合在一起，就能够产生一种总体上的变化。在饲养狗、虎皮鹦鹉、马或培植玫瑰

时，每个人的经验就很容易使人相信，几乎任何一种生物都在一个小的规模上发生真正的进化。但在一个较长时间尺度上，伴有新种、属、族或更高分类单位的产生，那就是另一种不同的问题了。对于很多人来说都难于了解象和岩狸的近亲关系，所以要想形象地表示所有生命形式之间的相互关系，包括在数十亿年间才能出现的巨大变化，至今仍然十分困难。

对许多人来说特别难于接受的是机遇加选择压力（chance plus selection pressures），可以从一个简单的初始条件导致高级复杂的形式和由这些形式构成的复杂生态群体。但人们仍然无法由此相信，这种进化在没有某种指导干预、某种设计的情形下还能发生。（其他障碍中特别要指出的是意识的进化，其中自我认识是我们人类如此引以为骄傲的，人们觉得意识是不可能从无意识中产生。）在没有考虑到这些疑虑之前，我只能从外部考察它们。但对我似乎很清楚的是有一种办法可以免除这些疑虑，让人们体验几百万年极为随机过程加上自然选择而引起的巨大的变换。这只能由模拟来实现，像 TIERRA 那样，能在一个易于控制的时期内，迅速穿过许许多多代；而且更精确和更逼真的模拟，对未来也有用处。

用机遇和选择来描述生物进化时，我们会遇到各种突变过程。为了简单的缘故，我们假定它们完全是随机的。事实上，它们可能并不完全随机。有些作者举观察的证据为例，指出有时突变起因于非随机的方式，有时甚至于偏向于一些有利于增加适应性的方式。但是，这种偶然效应的可能存在并不会改变基本点，即在没有任何偶然的非随机变化时，就现在所知道的而言，生物进化仍然如现在实际情形一样有长足的进展。

在托玛斯·雷提出 TIERRA 以前，我在圣菲研究所召集了一小群爱思考的人开会，讨论我们能否发明一种计算机游戏，它既容易为大家喜爱又能让游戏者相信发生在许许多多代的进化过程中的巨大力量。这次会议的一个杰出的结果是，当约翰·霍兰德回家以后他发明了 ECHO，一种有趣的计算机模拟，它能对简

单有机体的生态进行模拟。但这种游戏只能用于教学的目的，而不能满足进一步的需要。过了不久，托玛斯·雷在完全独立的情形下发明了 TIERRA，它虽然并不真的是一种游戏，但可能最终产生同样的效果。

在会议中有些与会者指出，道金斯（Richard Dawkins）的《瞎眼的钟表工人》（*The Blind Watchmaker*）一书里有一些软件，是为说明进化的一种计算机游戏。不过，这种游戏并非我原来设想的那种。其要点是在真正的生物进化中，进化圈里并没有设计者。但道金斯发明了一种游戏，它使游戏者在进化过程中不断加入选择压力，这些游戏者很有些像为了制作图画而使用卡尔·西姆斯软件的用户。〔这个游戏的确有一个“漂移”任选程序（“drift” option），有了它游戏者可以让有机体单独存在，但他们仍然不能向有机体所属的生态群体施予选择压力。〕从（仅部分正确的）适应性来说，我们可以说在道金斯的游戏中适应性是外界产生的，由外界提供的；而在自然界中，如同他的书中所解释的那样，适应性是内部产生的，没有外界的干预，并最终由以下因素决定：地球和太阳的特性及偶然事件（包括巨大数量特殊种的进化）。一个游戏能设计得像托玛斯·雷使用 TIERRA 那样，让游戏者仅仅只需要一种初始条件和一组生物进化的规则，就能够让机遇和自然选择把游戏玩下去。这做得到吗？

适应因素的总体模拟

任何有关进化的系列模拟都必须包括数目巨大种群的相互作用，这些种群中每一种的环境由所有其他有机体和周围的物理化学情形组成。但是，当我们试图在一个比较短的时期（在这段时期里没有多少生物进化发生），了解这样一个生态群体会发生什么事情，会得到一些什么结果呢？我们将模拟一个生态过程。

许多与圣菲研究所有联系的理论家们利用计算机模型去认识这些复杂适应系统的性质，这些系统是互适应的适应因素的总

体，而这些因素又构成描述和预言相互行为的图式。这些研究者提出一种与这些系统有关的特殊见解，它由一些似乎可取的猜测和用特殊模型证实了的结果组成。由此得到的景象是这样的：在这景象里中间算法信息量的区间（在有序和无序之间）可能含有一种状态，它类似于自组织的临界状态，可以用沙堆为例加以说明。在这种状态中，关键量可能按幂定律分布。最紧要的是，整个系统可能有一种趋势，使这些幂定律向可以应用的方向发展。

斯图亚特·考夫曼（Stuart Kauffman）像佩尔·贝克（Per Bak）一样，对这些想法作了许多理论研究。有许多人用术语“对混沌边缘的适应”（adaption toward the edge of chaos）来描述它们，这儿“混沌边缘”用来暗指一种位于有序和无序之间的临界情形。斯图亚特也是这些人中的一个。完整的表示首先由诺尔曼·派卡德（Norman Packard）在一篇论文的题目中使用，这篇论文用一个非常简单的、以计算机为基础的学习系统来探讨这样一种临界状态。现在这个术语已在通俗文学中广为使用。在大约相同的时期里，克里斯·兰顿（Chris Langton）也独自作出相关的研究。

在生态学和经济学领域里这种幂定律为人熟知，它们有一些显而易见的应用，特别是在支配资源分布方面。在市场经济中有名的工资分布经验定律，较高收入的部分就类似一个幂定律。它是19世纪由意大利经济学家维尔弗瑞多·巴瑞脱（Vilfredo Pareto）发现的，他还发现关于个人财产的幂定律，也是大致上适用于财富较多的人。

生态学家经常盯着资源的分配，把它当作一个自然群体中不同物种的函数，其中每一给定物种的个体集中起来作为一个整体来利用这些资源。他们在这里也发现了一个经验幂定律。例如，美国边界南部柯特斯海（Sea of Cortez）的北端海岸的岩石地带，生长着许多不同的生物，如茗荷介和蛤贝，占据着岩石表面不同的面积。被不同种生物所占据的总面积遵循一个近似得非常好的幂定律。在食物链中较高级的其他动物则捕食这些岩石上的

居住者。在这近于食物链顶端的动物中，有一种有 22 个臂的星鱼。如果这种星鱼从图景中移走，会出现什么情形呢？由于某种灾害，这种情形在某些海岸段上可以实际发生，因此生态学家可以观察到上述设想的结果。结果是残留下来的生物系统将重新调整自己，岩石上将由不同物种的生物重新占据，所占面积与总面积之比也将为一新值替代。但是，近似的幂定律仍然有效。因此，互适应因素所形成的体系被一种资源按幂定律分布为特色的变迁方式所吸引。这种想法得到了某些经验的证实。

以规则为基础的数学和以作用因素为基础的数学

在今日许多有关复杂适应系统的研究中，数学起了非常重要的作用，但在大多数情形下，已不是曾在科学理论中占优势的传统数学。假定要研究的问题与一个涉及时间的系统有关，则系统在每一瞬间的状态将按照某种规则而变化。许多取得巨大成功的科学理论之所以能取得成功，都得益于连续统数学的帮助，在这种数学里时间变量是连续的，所以是描述系统状态的变量。状态不断地变化遵循一个用连续变量表示的规则，而这变量要能表征系统的特征。用数学语言说，系统的时间展开将由一个或一组微分方程来描述。在最近几个世纪里，基本物理学的许多进展都得益于这些微分方程的帮助，其中有麦克斯韦电磁理论方程组，爱因斯坦的广义相对论引力理论方程，以及量子力学的薛定谔方程等等。

当我们利用一个数字计算机来帮助解这些微分方程时，我们通常用一个所谓的离散变量逼近于连续时间变量，即把一些值分离成有限的间隔，以代替我们所研究的由开始到末了那段时间内的所有可能值。而且，那些可以表征系统状态的连续变量，也可以用离散量来近似表示。于是，微分方程由一个差分方程代替。当离散变量（包括时间）相邻值之间的间隔越来越小时，差分方程就越来越像被它所代替的微分方程，于是数字计算机就越来越

接近解决原来的问题。

这种经常用来模拟复杂适应系统的数学，酷似在一台数字计算机上用来逼近连续微分方程的离散数学，但现在离散数学已不仅仅是一种近似，它已因自身的目的而被使用。还有，描述系统状态的变量可能只取少数几个值，并用这些不同值表示可供选择的事件。（例如，一种生物可能或不可能吃另一种生物；两种生物可能或不可能进行争斗，如果争斗，一个或另一个将会获胜；一位投资者可能买、握住不放或卖掉一种股的股份。）

在描述一个物种的多少代或金融交易时，时间变量甚至可以迅速地经历几千个值，这决定于是什么问题。另外，在系统每个这些离散的瞬间，在很多问题中，由这样一种规则来决定，这种规则不仅仅依赖那时的系统状态而且也依赖一种偶然过程的结果。

我们讨论的离散数学经常称为以规则为基础的数学（rule-based mathematics）。对数字计算机来说，它是一种天生合乎需要的数学，并常常用来模拟由很多个体适应因素构成的复杂适应系统，其中每一种适应因素自身也是一个复杂适应系统。一般来说，这些代理——如在生态群体中的各种生物，在经济学中的个人和商店、企业、公司——都涉及描述其他因素行为和怎样影响这些行为图式。在这样的一些情形下，以规则为基础的数学变成了以作用因素为基础的数学（agent-based mathematics），例如在TIERRA中就是如此。

让经济学不再沉闷*

最近学者们利用以作用因素为基础的数学来指导经济学，使它趋近于一种更加进化式的探索。在过去的几十年中，经济学家

* 在英美等国将政治经济学称为沉闷的科学（the dismal science），所以这儿 Making Economics less Dismal 有双关之意——译者注

曾经用一种带有理想平衡的偏见，描述了许多经济理论的特征。这种偏见是以完善的市场、理想的信息和作用因素的完全合理性为基础的，它完全不顾有些最优秀经济学家的努力，他们努力想把上述三种不完善性注入到第二次世界大战后的新经典综合中去。

在经济学家中有一个故事久为流传，故事说一个新经典的理论家和他的行为得体的小孙女，在一个美国大城市的街上行走，小姑娘把一张 20 美元的钞票放到人行道上，然后礼貌地问她爷爷，把钞票拾起来合适吗？爷爷回答说：“不行，亲爱的，除非真有某个人已经把它拾起来了。”

在几年里，许多学者（包括圣菲研究所主持的一个多学科网络中的一些成员）把他们的研究转向经济学，把经济学看成是一些由适应经济因素组成的复杂适应系统，这些因素只具有有限的合理性和不完善的信息，并在机遇和感知经济自身利益的基础上发生作用。此后平衡理论非常成功地预言了近似于真实的情形，特别是那些在预言附近的涨落与真实情形符合得相当好；但最近一些研究与这些预言有些出入。

有一个非常简单的模型，它是由亚瑟（W. Brian Arthur）、约翰·霍兰德和里查德·巴尔末（Richard Palmer，杜克大学和圣菲研究所的一位物理学家）提出的。在这个模型里，单一债券（如一种股票）的投资者被看成是适应因素，他通过一种中央清洗室（central clearinghouse）与其他人发生相互作用。每一股一年付息，这个息可能以不同方式随时间而变化。运转中的年利率是不变的，股息与利率之比要决定于每一股份的基本值。每一股的实际价格可以大大地不同于基本值。在股票价格的历史基础上，每一种因素不断构造出一些基本图式，这个图式告诉他或她什么时候买进、卖出或坚守不动。在任何时候，不同的作用因素可能采用不同的图式。更有甚者，一个给定的因素可能同时拥有几个图式，并根据具体情形不时地掉换图式。在这种情形下就会引起价格的涨落，而且经常是狂涨暴落，再加之基本价值的缓慢

改变，于是价格与时间的曲线是一个锯齿状的逐渐降低的曲线。这样的狂涨暴落，以及真实市场运转的回忆，使我们找到一种进化模式，这模式中的诸种因素远谈不上完善，但试图努力学习完善。

在改革经济的运动中，许多参加者已经证实完全的合理性不仅与人类实际事务有明显矛盾，而且也与市场出现任何涨落的情形相矛盾。许多心理学家、经济学家，甚至人类学家在处理人类的各种问题时，有一种把它们完全或近似合理化的趋势。对此，我常常感到惊讶不止。我个人的经验是，无论在进行思考或观察其他事物时，合理性仅仅是控制人类行为的许多因素之一，但决不总是主要的因素。假定人的行为总是合理，这可以比较容易地建造一个人类如何行动的理论，但这样一个理论经常极不现实。哎呀，这正是今天社会科学和行为科学经常犯的主要毛病。当这种毛病进入复杂现象的理论时，使理论更加便于分析固然会带来方便，但对于更好地描述现象来说却并不需要如此，有时还很容易使事情变得更糟。

经济理论在了解人类事务方面的伟大贡献，在我看来，就是一再强调刺激、鼓励。在任何情况下，对不同的作用过程的刺激到底是什么？当第一次发现死海古代文书手卷时，考古学家希望发现更多的手卷残片，于是把注意力转向流浪的阿拉伯牧人。这些误入歧途的学者们对每一块残片提供固定的报酬，结果牧人们在把残简送给学者们之前，先把它扯破成一块块残片。经济学家们常常用一种令人迷惑的方式研究刺激如何影响整个社会运作，他们指出各种不同图式的缺点，指出政府或商业中的缺点，这些缺点就十分类似死海古代文书手卷使用的报酬方式。刺激为经济学提供了选择压力，即使当刺激的反响并不充分合理时，甚至如果有其他压力在起作用时，经济的刺激仍然可以帮助经济学家确定哪种经济行为的图式将占优势。人类的创造力总可以找到一些办法从已有的刺激中获益，正如生物进化总是可以最终填满空着的生态学的小生境 (ecological niche)。用一种进化的方法研究经

济学和承认人类（行为的）有限制的合理性，仅仅只能够改善经济学家对刺激运作方式的深入理解。

圣菲研究所最成功的活动之一是它的一些研究人员提出的经济计划，这个计划利用了对新理论的模拟并制作了高质量的模型。当然啦，最终的成功还有待于证实，像所有理论科学一样，要用对现有资料的解释、为未来观测所证实的正确预言来证实。这个研究所还太年轻，而研究的问题又太困难，要想取得更大的成功还做不到。未来的几年将是对研究所工作结果作出判断的关键时刻，制作经济模型如同其他努力所获得的成果一样，其结果要由证实预言来决定。

但是，经济学理论还迫切需要其他一些形式。在圣菲研究所的经济计划中，原来曾经考虑过这方面的问题，但还没有实现。一个极需解决的重要问题是，我们要适度重视难于量化的价值。

经济学家有时受到人们讥讽，说他们要用卖淫的价格来测度爱情的价值。有些东西的价值容易用钱来估计，仅仅用成本-利润计算来考虑这些事物是十分诱人的，但常因此而忽略了其他一些不能这样计算的事物。如果建议建造一个水坝，以前的成本-利润分析要考虑像电力、水流控制这些利润。另外，坝所造成的储水区可以设计得具有娱乐价值，它由小游艇船坞和快速游艇的码头所需的成本来测度。由于储水区储满水时河流两旁被淹没的建筑，其代价可能对大坝设计不利，还有被淹没的植物和因水淹而离开的动物，以及被毁坏的村落，这些都不利于大坝的设计。对这类事情指出其货币上的价值，是十分困难的。

忽略难于量化的价值，这种十分精明的做法经常被宣扬为价值自由（value-free）。实际上它说明对一刚性价值系统任何分析的利用，只有益于那些容易量化的部分，而对那些更容易损坏但也许更重要的部分却不利。我们一生当中，常常因为以这种思想为基础作出的决定而受窘。

许多经济学家和政治学家都劝告人们，要放弃那些政治过程中易于损坏的价值。但如果真的这么做了，那么所有定量研究，

以及他们对价值易于量化部分所作的仔细的计算，就必须由决策者掂量一下那些质量上的论证，可惜这方面还没有大量类似的支持。现今人们的思想正取得具体的进步，选民们对于改进空气质量，或保存公园以及要有好的周边环境十分重视。价值的取向进步了。在经济理论中，民众的选择经常被看成是精确确定的、固定的和已经给出的。这是与民主思想相符合的观点。但是，我们行星的命运仅仅是一种天真的意见吗？科学不能对此提出什么深刻的意见吗？

当变化被认为是不可逆或近似不可逆时，自然科学似乎特别有说服力，它的见解特别中肯。现在的经济学对不可逆性给予了足够的重视吗？在物理学中，热力学第一定律就是能量守恒定律，在物理学中追踪能量的线索有些像在经济学中追踪货币的线索一样。但是，在经济学中什么东西类似于热力学第二定律呢，即在一个封闭系统里熵有增大的趋向（或保持不变）。熵使我们在物理学中定义不可逆性，许多学者想在经济学中定义一个对应的概念，但至今为止还没有取得显著的成功。也许这种要求根本没有希望。但也许这事值得一干，因为它可能对广为人知和几近死亡的概念作出某种改进，被某些替代品，如塑性树（plastic trees）取代。

同时，某些重要的经济学家提出了一些概念，把下面一些事件仅仅视为易于具有货币性质。“精神报答”（psychic pay）的概念注意到这样的事实，人们因为帮助他人而获得自尊、骄傲和满足，这些东西难于用金钱衡量。“信息成本”（cost of information）是说，如果人们没有必需的事实和洞见，就可能不知道如何作出合理的决断（例如购买货物）。“社会贴现率”（social rate of discount）是用以处理各代人之间的债务——一给定代的人对未来给予多少贴现，将深深关系到对未来的几代人准备留下些什么。

不管怎么说，在商业、政府及国际代办处工作的经济学家们可能发现，把这些新概念包容到他们的报告、推荐信中并不容易。还有，把这些概念定量化可能十分困难，即使它们已经被引

入了理论。

在理论和实践中都留有改善的余地，使经济学注重易损害价值（特别是那些有不可逆消失危险）的问题。任何改善的实施都对生物的保护和文化的多样化有特殊价值。

第 四 篇

多样性与持续性

第二十一章 多样性濒临危险

前面我们已经讨论了简单的规则（其中包括一个有序初始条件），怎样在偶然性的作用下，产生宇宙中丰富多彩的复杂性。大家知道，复杂适应系统在形成之后，它们将通过一种回路来运作，这个回路由可变图式、偶然环境、表型结果以及选择压力对图式竞争所起作用的反馈构成。它们倾向于探测出大量的可能性，开辟出高层次的复杂性与新型的复杂适应系统。在漫长的时间里，它们从自身的经验中提炼出大量兼具复杂性与深度的信息来。

无论在任何时候，储存于这样一个系统中的信息都包括来自其历史的因素。不但历经 40 亿年左右的生物进化是如此，而且时间很可能只有 10 万年的智慧人的文化进化，也同样具有这一特点。在这一章，我们将讨论在保护这两种进化所产生的多样性（至少保护其大部分）的过程中所遇到的一些难题与进退维谷的情形。

与前面章节不同的是，这里的重点将更多地放在行动与政策

方面，而不放在有关上述两种多样性的知识与理解上。同样，这里的建议与观点不但是从学者的角度，而且也是从倡议者的角度提出的。在下一章，我们再进而讨论这样一个广阔的背景，在其中可找到一个持续的、理想的未来，并讨论怎样构想那样一个背景。

尽管我们的讨论大多集中于科学与学者专家的作用方面，但我们必须牢记住，试图将解决方案强加给人类社会的努力最终常常会导致毁灭性后果。只有通过教育、参与、一定的舆论，及人们普遍认识到他们每个人都与最后的结果有着利害关系，才有可能实现持久的、令人满意的变化。

生物多样性的保护

我们已经指出了向每个人传达（例如通过计算机模拟的方式）这样一个观念的重要性，即一个祖先怎样通过传递差错与基因重组及自然选择而产生出有效复杂性，这种复杂性已由当今存在的生命形式惊人的多样性所显示。那些生命形式包含了大量信息，这些信息是通过地质年代而逐渐积累起来的，其中包含有地球上生存方式及各种不同生命形式之间相互作用方式。但迄今为止，这些信息为人类所了解的仅是多么小的一部分！

然而，通过大量生育及每个人（特别是每个富人）对环境造成的破坏性影响，人类已经开始导演一出绝灭之剧，最终它的破坏性也许能同过去的一些大绝灭一比高下。历经如此漫长时期的进化才积累起来的复杂性，在几十年的时间里就毁灭掉其中很大一部分，这难道合理吗？

难道我们人类将像某些其他动物那样，为生物需要所驱使而见缝插针地去占据每个可利用的地方，直至饥荒、疾病与战争来限制我们的人口吗？或者我们将利用我们自己引以为豪的、也是我们人类这一物种所特有的智慧？

随着 20 世纪临近结束，人类所面临的最重要任务之一就是

保护生物多样性。这一事业涉及到世界各地各行各业的人们，我们应该用多种方法来决定需要做些什么，特别是首先需要做什么。虽然在不同的地方优先的选择有所不同，但还是存在一些普遍适用的原理与策略。

热带地区的重要性

最需要保护的地方（尤其是陆地上）似乎在热带地区，那里物种最多，但同时使用自然资源来养活一个贫穷而又快速增长的人群的压力也最大。这样一种状况——物种较多，但被毁的危险也更大——使热带地方的生物保护尤为紧迫。

热带与温带的区别不仅在于物种的数量不同（其中热带许多物种现在正濒临危急），而且还在于对它们的了解程度不同。在温带地区，通常可以通过考察单个物种（至少对“高等”植物与动物可以这样）并测定哪些物种在地方、国家或世界范围处于危急状态，来判断一个地方需保护的程度。如果考虑生态群落的话（这当然也是应该考虑的），我们可将它们看作由已知物种所组成的团体。

但在热带地区，还有无数物种尚为科学所未知，甚至还有整个的生态群落也没有得到充分的研究。在这种条件下，以基于物种的方式这样一个通常规则来确立保护目标，是不切实际的。我们常常需要将精力集中于拯救典型系统上，这些系统包含着具有代表性的单个物种。但是，如何定义这些系统也并非总是轻而易举的事。

科学的作用

科学对于热带生物保护具有重要的作用。如果我们没忘记科学的目标不仅是积累事实，而且还要通过发现信息中的结构（即规律性），以及尽可能探究出现象所反映出的机制（即动力学解

释), 以此来增进理解, 那么, 科学在热带生物保护事业中的作用将更加明了。

有一系列的方法可以用来收集、组织与解释有关整个热带地区自然群落状态的数据。分类生物学家(那些研究动植物分类与分布的科学家)比较赞成长期性的研究, 这些研究可能需要耗费好几十年的时间, 所得出的研究结果也将在未来的长时间内具有很大的重要性。短期研究则是通过诸如卫星摄影术与空中摄影术这样的技术进行研究, 它们能很快产生出一些有关地表植被变化的粗略指标。为了弄明白那些变化意味着什么后果, 还需要了解“地面事实”, 这些事实就得多少要细致一些, 通常需要通过探险活动与大量分类工作才能完成。这种工作是介于长期的地面研究与快捷的空中及太空考察之间的一种中等时限的研究。

对于在热带地区已开始发生大规模的、人为的绝灭性行为这一事实, 人们已经不再有任何严重的分歧。对一些人来说, 不应该肆意毁坏经数十亿年进化而得来的产物是不言自明的; 但对另一些人来说, 则需要摆出一些额外的理由才能使他们相信保护面临危险的事物的的重要性。这些理由包括, 我们正在消灭的那些甚至还不为我们所了解的物种对人类具有潜在用途; 更重要的是, 它们对将来几代人才能理解的那些相对来说尚处于不那么恶化的状态的复杂生态系统之运作, 有很大的价值。科学家的任务之一, 就是详细地解释这些论据。科学不仅能为优先权的确立提供指导, 而且还能为这些优先权提出易于被人们理解的解释。

换句话说, 生物多样性的保护需要更多的科学知识, 以使保护主义者对于如何进行保护有一个清楚的概念, 而且也使人们能够理解他们所采取的行动。正确的、组织得当的信息, 能够帮助更广大社会阶层的人们认识到保护各种不同生态群落的活样本的重要性。我敢断言, 在这项努力中, 使用与发展生物地理学学科具有重要意义。

生物地理学是研究动植物分布, 以及那些分布如何演变的学科, 其中还涉及到地质概况与地形的影响。它研究变异、散布、

生存及绝灭等过程，不仅包括那些正在进行的、决定当今各种生物分布区域的过程，而且还包括过去所经历的发展阶段。生物地理学与分类学和生态学均有着密切的连带关系，它可以提供一个理论体系，帮助我们将有关动植物物种发生的资料，作出有效的组织和分类。它还能提供一种生态群落分类法，而且它还能帮助规划出切合实际的保护区之轮廓，对判断已有系统所存在的漏洞也有很大的帮助。

快速评估

从科学的观点来看，坚持那种不能提供即时结果但能给出持久性结果的长期研究是必要的。然而，保护行动显然不能等那些结果出来再进行。如果等到野外生物学家完成对一个特定热带地区动植物的详细、彻底的研究，再来推动对那一整个地区或其中部分地区自然群落的保护，可能为时已晚，因为那些群落可能已不复存在。

如果按照保护行动所必要的科学方法来行事，这将要求人们创造性地利用所有潜在的资源。尤其是，一些野外生物学家（例如植物学家、鸟类学家和爬虫学专家），从他们的个人训练、野外经验及科学知识中，学会了如何对他们所研究的热带区域的物种作一个快捷的、粗略性的普查。他们对各种生态群落之成分有一个大致的概念，并提出了一些快捷的方法来确定一个环境的退化程度。他们的知识与智慧可以、也应该应用到保护工作中去。他们不仅能帮助评估一个特定地区的生物多样性及其自然群落的保护状态，还能帮助确定哪些生态群落局限在小区域内，哪些处于严重的危急状态，因而能为那些确立保护优先权的人提供非常有价值的建议。这些野外生物学家不仅能促成分类生物学与生物地理学方面长期研究的成功，还能在很大程度上促使那些为卫星摄影提供地面事实的短期探险获得成功。

培养更多像他们那样的科学家非常重要，在热带国家尤其如

此。

通过约翰·D与凯瑟琳·T. 麦克阿瑟基金会 (John D. and Catherine T. MacArthur Foundation, 我在其中任理事), 我帮助设立了由国际保护协会赞助的快速评估计划 (Rapid Assessment Program)。其中的核心团体由一个鸟类学家、一个哺乳动物学家和两个植物学家组成。通过与其他野外生物学家联合, 他们成立了几个小组来考察一些特定的地方 (迄今为止主要集中在美洲地区)。到目前为止, 那些小组已经考察了最初在空中视察时辨认出来的各种不同的地域, 包括干燥森林、山地云雾林及低地雨林。考察目的是为了查明它们是否具有足够的生物多样性, 以及它们是否被保护得足够好。

1989年, 我与当时是国际保护协会官员的斯彭瑟·比伯 (Spencer Beebe) 及评估计划成员鸟类学家特德·帕克 (Ted Parker), 一起参加了一次空中视察。我们在玻利维亚发现了一个非常大而且保护得很好的森林区, 阿尔托马迪的 (Alto Madidi), 并把它确定为评估计划的一个近期目标。这一地带从亚马逊低地雨林延伸到好几种高山森林 (虽然它距亚马逊河有数百英里远, 但其多余的雨水仍然通过亚马逊河支流汇入到主河道中)。后来, 评估小组考察了该地区, 并在地面上对它进行了研究, 结果发现它在多样性与质量方面甚至比我们在空中观察时所估计的还要更引人注目。如今, 玻利维亚科学院和玻利维亚政府正考虑将保护区扩大到阿尔托马迪的可能性。

与特德·帕克一起穿行在南美森林中, 我发现他的确很出色, 一点不负我曾听到的对他的崇高评价。在所有我陪同过的相当熟练的野外鸟类学家当中, 他给我留下的印象最深刻。他记住并能识辨出三千多种新大陆鸟类的鸣叫声。往往一连几天, 他仔细识辨青蛙、昆虫或一个特殊鸟种所发出的每一种声音。每当我们录下鸟类的叫声, 并通过重放它们的叫声而将鸟类招引过来时, 他的判断总是得到证实。但是在以后的某一天, 当他听到发自矮树丛的一种模糊不清的“咻嘶特”声时, 他可能会惊呼,

“我搞不清楚那是什么!”必然无疑,它将是当地或该国家的一种新鸟,有时它甚至可能是科学上的一个新物种。

在黎明时分驻足倾听林中的鸟鸣声,他能估计出该栖息地的鸟类多样性与质量。他的同事,哺乳动物学家路易斯·艾孟斯(Louise Emmons)和植物学家阿尔温·根特瑞(Alwyn Gentry)和罗宾·福斯特(Robin Foster),在他们各自的专业领域也有同样的熟练程度。

最近,一场悲剧降临到这个杰出的小组。特德与阿尔温以及一位厄瓜多尔同事艾都尔多·阿斯比竹(Eduardo Aspiazu),在一次空中视察中因飞机坠毁而身亡。飞行员也牺牲了。像往常一样,生物学家要求飞行员飞低一点,以使他们能在空中更仔细地巡察森林(他们正在搜寻瓜亚基尔附近一小片在其完全消失之前应该加以保护的幸存干燥森林)。突然,飞机误入云层,能见度突然急剧降低,他们撞到了附近一座山上。

在哀悼我们的朋友不幸去世的同时(他们似乎留下了难以弥补的空白),我们中间那些参与热带保护的同仁希望,快速评估计划的工作能继续进行下去。我们希望,他们留下的空缺将被其他差不多具有同等熟练程度的专业野外生物学家来填补上,也希望训练一批新人,特别是热带国家的公民。

通常,热带生态多样性保护的前途,在很大程度上依赖于热带国家本地不断壮大的科学家与保护主义者群体的行动。总的说来,重大的保护决策必须在国家层次上作出,各个国家应有数量越来越多的民间组织担负起生物多样性保护的主导作用。温带国家中一些国际著名的科学家有时能施加有效的影响,但如果没有地方与国家的支持,保护就不可能实现。

地方民众的参与

事实上,保护需要多方面的支持,既需要大多数来自大城市的颇有影响力的个人去启动保护计划,又需要广大的地方农村居

民来长久维护自然保护区。如果不得到当地人们的赞同与支持,较大地区的长期保护就不可能取得成功。这意味着需要强调环境保护对农村发展的重要性。例如,农业常常依赖于流域的保护,森林物产长期有效地供应也常常需要附近森林的保护能坚持下去。当地人们必须认清自然保护与经济利益之间的利害关系,而且他们需要理解那种利害关系。他们可能往往与保护地区有着直接的关系,例如,可通过自然旅游业创利或具有在国家公园做向导或林务员的机会。

使当地的土著人,比如新热带的美洲印第安人,参与自然保护具有特别的重要性。在许多情形下,他们的文化连续性,甚至他们自身的生存,所受到的威胁更甚于他们周围的动植物。他们那历经许多世纪而积聚起来的有关他们环境的知识,不仅能帮助寻找可谋生而又不破坏周围生态群落的生存之道,还能帮助识辨本地生物对人类的用途。在有些地方的保护行动中,土著人甚至已经走在了前面。例如,巴拿马的库纳人建立了一个公园,其面积占他们大陆面积的很大一部分。(很多库纳人生活在圣布拉斯岛上,他们在当地以制作各种彩色的摩娜斯(molas)而著称,这种摩娜斯是衣服与手提包的一种很漂亮的装饰物品。)

热带森林中生物谋求生存的斗争导致了化学武器竞争与其他一些过程,在这些过程中能产生具有潜在生物效应的化学物质,其中许多对人类(尤其在医药学方面)很有益处。科学家们正通过两种不同的方法来搜寻这样的化学物质。一种方法是民族植物学方面的,它是利用土著人经历数百年或数千年的试误法而获得的知识,因而不仅利用了最初产生那些化学物质的生物进化,还利用了文化进化。另一种方法是直接的化学探测,把从森林中找到的动植物样本(比如昆虫)带到实验室里,通过现代分离技术将新的化学物质分解出来。这里,生物进化的结果被直接使用,而没有借助于土著文化。两种方法都是旨在至少找到几种最终能派上用场的化学物质,比如被药物制造商使用(通常先在发达国家被使用)。即使是通过改头换面或人造的形式来使用这些化学

物质，我们也应该想办法将其中的大部分利益归还给森林中或其周围地区的人们。只有这样，研究与使用化学物质的过程才能使当地人们感觉到森林保护与他们之间有一种额外的利害关系。对许多出售其他诸如坚果与肉厚多汁的热带果实之类非木材森林物产的方案来说，也同样如此。跟通常的情形一样，动机创造出了对人类行为图式产生作用的选择压力。

保 护 范 围

跟树木砍伐一样，某些特定非木材森林物产（诸如那些需要进行捕猎的动物）的收集，也只能在充其量只需得到部分保护的地方进行。被广泛采纳并得到联合国认可的一个方案是建立生物圈保护区。一个典型的生物圈保护区有一个核心区域，通常是一个被全面保护的荒野的流域以及一个外围地区。在那里，可以允许部分物产采集，但需要特别注意保护。再往外但仍属于保护区范围的区域，可以从事农业与其他正当的经济活动，但有一些限制。

显然，建立一个包括某些生物圈保护在内的全面保护的天然区域系统，仅只是所需要做的事情的一部分。在那些地区之外还需要实施众多的保护行为。它们包括树林的再造（在任何可行的地方种植本地树种）；实施明智的水与能源政策；处理农业、采矿业与制造业的环境问题；解决最重要的人口增长问题。而且，极需要发展综合性的国家与地区保护策略。

这种广义保护在许多方面都需要有巨大的财政开支，这是比较贫穷的国家所难以承受的。对温带地区的发达国家来说，承担起大部分的责任也是造福于后代的有见识的利己行为。如果热带的生物资源继续被浪费，那么，我们生活在这个星球表面的所有人人都将生活得更加糟糕。无论何时，发达国家向贫穷国家提供援助，不管是通过赠送、借贷，还是部分减免的债务形式，都应特别指定其中的大部分作为广义的保护之用。作为援助条件而达成

的自然保护协议是“星球交易”（planetary bargain）的一个方面。最近几年里，实施了许多“债务交换”（debt swaps），这些借贷给热带国家的债务，在世界金融市场上大大地打了折扣。它们首先由保护组织提请，然后再经贷方国家政府认可其面值。这笔款项通常只能用于购买土地，以设立保护区。（同样的原则也可以适用于其他值得追求的目标，比如落后国家的经济发展，或其国民在国外的高等教育。）债务交换是所实行的星球交易的极好的范例。

如果你退后一步，去估计一个成功的综合热带多样性保护计划赚钱的可能性，结果可能并不那么乐观。然而，历史清楚地表明，人类的进步不是由那些不时停下来猜度其冒险之最后成功与失败的人们所推动的，而是由那些先深思熟虑，看准正确的目标，然后全身心投入该事业中的人所推动的。

文化多样性的保护

就像在几十年里浪费掉大部分历经数十亿年进化而得的丰富生物多样性是疯狂行为一样，允许大部分文化多样性消失也是同样狂热的行为，这种文化多样性是以与生物进化差不多相似的方式经过数万年进化出来的。然而，人类的联合（以及人类同与我们共享生物圈的其他生命形式和平共处）现在是一个比以往任何时候都更重要的目标。那么各方面的利害关系怎么样协调起来呢？

还在很早的时候我就开始意识到了统一与多样性之间的紧张状态。当我还是个小孩的时候，我向父亲提出了这样一个古老的问题：人类是否可以通过只使用一门世界语就能促进普遍的和平？作为答复，他向我描述了在两百年以前的文艺复兴与法国革命时期，文艺复兴人物与浪漫主义运动的先驱，德国思想家赫德（Herder）的一段话：有必要为保护语言多样性而拯救处于威胁之中的拉脱维亚语与立陶宛语，这是两种非常古老而且与古代印欧语系很相近的语言。在当时本土作家如立陶宛诗人多涅莱狄斯

(Donelaitis)的帮助下,保护那些大量文化DNA的工作取得了成功。如今拉脱维亚与立陶宛又一次成为独立国家,两百年前从绝灭的边缘拯救起来的那些语言,现在是他们的国语。

极具挑战性的文化保护问题牵涉到土著人,尤其是那些因为其落后的技术状态而有时被称为原始人的土著人。许多情况下,这些土著民族要么受到疾病与暴力的威胁,或遭到驱散与排斥而被迫背井离乡,要么其文化遭到消灭。一个世纪之前,在美国西部一些地方,少数人仍然在周末射杀“野印第安人”。如阿尔弗雷德和梯恩多拉·克鲁耶伯(Alfred and Theodora Kroeber)所记述的那样,最后一个雅希(Yahi)人艾希(Ishi)就是这样悲惨地失去了他的家庭和朋友。如今,北美人对其他国家发生的此类暴行深恶痛绝。让我们期望,这种危险情形在现在能很快得到改善,使那些民族具有更好的生存与选择机会。要么任他们暂时保持现有的生活方式,要么帮助他们实现根本性的现代化,但要在一定程度上保持其文化连续性与传统。

世界各地的土著民族的风俗习惯与生活方式,以及他们所掌握的丰富民间知识,构成了一个关于人类组织与思想方式各种可能性的信息宝库。其中许多民族还具有关于如何在一个热带群落中生存的宝贵知识。(应该注意的是,另外有些民族还一直在破坏着自然环境,尤其是那些在从前没有人烟的大岛或小岛上生活还不到一两千年的民族。某些情况下,土著人民与自然和谐相处的观念只能是美好的愿望而已。)

可是,让我们试想一下,某些部落的巫师该掌握多么丰富的植物性能方面的知识啊!这些巫师有许多正面临后继无人的危险。伟大的哈佛大学的民族植物学家(ethnobotanist)理查德·舒尔特施(Richard Schultes)花了许多年时间研究亚马逊盆地上有药用价值的植物。他说,每死去这样一个巫师,就好比烧掉了一部文库。舒尔特施已经培养了许多年轻民族植物学家,他们将赶在那些文库全部消失之前从其中抢救出尽可能多的秘诀。他们之中一个叫马克·普洛特金(Mark Plotkin)的学者最近出版了一部

名为《一个巫师学徒的故事》(*Tales of a Shaman's Apprentice*)的书,记述了那些奇异的经历。

经过数百年或数千年的试误式学习,人类提炼出了大量有关使用生物来为其衣食及治病服务的信息。学习的过程有时肯定是相当富于戏剧性的,比如亚马逊雨林中苦木薯被人们认识的过程可能就是如此。森林地被上生长的植物不多,因为上、中与较低层的树冠挡住了大部分的阳光。在这种条件下,苦木薯(其块茎可提炼出木薯淀粉)就成了很有营养价值的食物资源。但是,未经提炼的块茎含有大量的氰氢酸,因而对人类有很大的毒性。只有通过加热使之分解,除去氰氢酸之后才可以食用。亚马逊丛林中各种群体或部落里饥饿的人们在学习如何使用苦木薯的过程中,肯定有无数人为此失去了生命。

通过试误式学习揭示出植物与植物药剂的有益性能的现象,并不仅仅是在这些比较不发达地区存在。民间医药对世界各地人们的生活有着巨大的影响。当然,并非所有的民间药方都有效,但至少其中一些已被现代科学所证实。在我父亲身上就曾发生过这样一件事情。我爷爷曾经是位林务员,在我父亲小的时候他们居住在奥地利东部接近俄国边境的一片山毛榉树林中。一次,我父亲不小心用斧子砍断了一节手指。他找到掉落的那节手指,用水洗净,将它放回原处,然后用面包做成的糊剂将它裹起来。一个环状伤疤此后一直伴随着他,但那节手指头确实实接上了。很多年以后,现代科学才认识到面包霉中的“特异青霉”(一种产生青霉素的真菌——译注)具有抑制细菌的性能;毫无疑问,正是这一性能挽救了我父亲的手指。

在人们作出这种有用发现的适应过程中,选择压力必然也与科学一样,提出了非常相似的一些问题:这一过程真的管用吗?人们能安全地食用这种食物吗?用这种方式包扎的伤口能愈合吗?这种药草能在预产期过后帮助妇女开始分娩吗?

起源于交感巫术的民间疗法则又是另一幅不同的图景。建立在相似性基础上的传统疗法中,有一种是针对黄疸病(实际上是

肝病的一种症状)的,它要求病人盯着一个石制杓鹬的金黄色眼睛。如果我父亲试用那种方法,那么除了有稍许心身效应之外,很可能不会有什么益处。在普遍存在于世界各地各民族中的交感巫术的发展过程中,正如前面我们已经强调过的那样,其选择压力通常不同于与在客观上取得成功的那些选择压力。

然而,对那些民族来说,巫术与动植物真正用途的发现这两者之间,未必有什么明显的区别。但巫医总归是巫医,即便他们的确教会现代人们使用一些天然药物,比如能从金鸡纳树皮提炼出用于治疗疟疾的金鸡纳霜(奎宁)。文化传统往往不可能轻易地划分成这样两部分,即其中一部分容易与现代观点相合,而另一部分则与现代观点相抵触。

启蒙与文化多样性之间的紧张状态

启蒙所拟想的普遍性需要与我们保护文化多样性的需要之间的紧张关系,至今依然存在。在讨论地球的未来时,我们利用科学研究结果,并试图用理性的方法来思考这些结果的含意时,我们深为迷信的盛行所困扰。坚持错误的信仰更加重了这样一个普遍存在的时代性错误,即不能认识到我们地球人所面临的迫切问题。显然,哲学上的不统一,尤其是消极的排他主义,正以多种方式严重地威胁着我们。这种排他主义仍然以古老的宗派主义形式而存在于很多地方,但如今它可能还与国籍、语言、宗教差别或其他一些差异有关。这些差别有时如此之小,以至于局外人几乎察觉不到,但在适当条件下仍然足以引起极度的对立与仇恨。

但与此同时,文化多样性本身又是应受到保护的宝贵遗产:各种语言的混杂,宗教与伦理系统的大拼凑,形形色色的神话,政治与社会传统的大杂烩,而它们通常都伴随有多种形式的非理性与排他主义。人类面临的主要挑战是使诸如科学、技术、理性及思想自由之类的普遍化因素,与诸如地方传统和信仰以及资质、职业、地理差异等特殊因素协调起来。

普遍的大众文化

然而，世界各地的地方文化模式所受到的侵蚀，并不全是或甚至并不主要是由于科学启蒙的普遍化作用所致。大多数情况下，大众文化（popular culture）在抹去两个地方或社团之间的差异方面极其有效。牛仔裤、快餐、摇滚乐以及美国电视连续剧已风靡世界许多年。而且，普遍化影响不能简单地归类于科学文化或大众文化。相反，它们构成一个连续统，一个包括各种不同文化影响在内的整个范围。

占据深奥文化与通俗文化之间一个中间位置的是有线新闻网（Cable News Network，缩写为 CNN）这样一些机构。在某些地方及某些情形，CNN 广播能为你提供在别处得不到的很有价值、及时、重要思想的来源，以及准确公正的信息。在其他情况下，它们似乎被认为代表一种娱乐形式，是普遍化大众文化的一部分。无论如何，世界各地接收到的新闻广播与许多国家中日报与周报或周刊上发表的新闻文章，被认为是世界性“信息爆炸”（information explosion）的一个方面，此外，其他非小说性刊物与书也大大地增加了，更不用说迅速增加的电子邮件网络与即将到来的交互式多媒体通信爆炸。

信息（或错误信息？）爆炸

不幸的是，上述信息爆炸很大程度上是错误信息的爆炸。我们所有人都处于大量资料、信息的包围之中，它们包括数据、观点与结论——其中大部分是错误的或被误解的，或简直就是混乱的。现在急需更多富有才智的注释与评论涌现出来。

我们应当高度赞扬这样一种创造性工作，即撰写严肃的评论文章与书，将可靠的与不可靠的信息区分开来，并以合理、成功的理论与其他图式形式将看似可靠的东西加以系统化与归类。如

果一个学者发表一个科学或学业知识前沿的新研究结果，那么他或她可能会得到奖赏，或获得一个教授职位，或得以晋升级别，即便其结果在后来可能被证明是完全错误的。然而，仅解释过去已做工作的意义（或将值得学习与不值得学习的东西分别开来）是不太可能获得晋升机会的。如果对奖励结构作些修改，以使职业选择压力不仅偏向于信息获取，同样也对信息的分类工作有利，那么人类的前景将更加美妙。

容忍不愿容忍的——这是否可能呢？

那么，我们怎样对各种思想进行批判性审查呢？怎样带着对文化多样性的宽容——甚至带着赞美与保护的心态——去识辨与归类错误性的东西呢？我们已经讨论过每种特殊的文化传统怎样将一些不同的观点与信仰纳入自己的文化中，作为其艺术的主题，其特有的统一社会的力量，以及作为面对悲剧时的个人安慰感的源泉。如我们所强调的，这些观点与信仰中有许多从科学的角度来看是错误的（或至少是没有证据证明的），而另一些则描述了关于自然界、人类个体以及社会发展之可能形式的宝贵发现（或许还包括开辟神秘主义经验的新领域和促成物质欲望退居精神欲望之下的价值系统形成）。然而，文化多样性的保护必须设法超越这种差异。作为文化 DNA 要素的图式或模式，不能轻易地划分成值得保护的与不值得保护的两类。

还有更大的困难。许多地方思想与行为模式不仅与有害的错误及消极的排他主义结合在一起，而且尤为重要，这些模式还牵涉到针对那些支持普遍化科学与非宗教文化、强调理性与个人权利的人们的侵扰与迫害。不过也正是在这样一种文化中，你常常可以发现人们在原则上关心文化多样性的保护。

不管以什么方法，人类必须设法尊重与使用大量的文化传统，同时还要抵制传统中那些不时引起不团结、压迫与反启蒙主义的思想的威胁。

第二十二章 向一个更加 持续的世界转变

生物多样性的保护问题与整个生物圈的未来问题分不开，而生物圈的命运反过来又与人类未来的几乎每一方面都有着密切的联系。我打算在这里描述一种关于人类及生物圈其他部分的未来的研究计划。不过，那一计划并不要求有威力无比的预言。它只要求各机构各行各业的人们一起来考虑这样一个问题，即是否有一个渐进的方案，使 21 世纪能向一个更接近于持续的世界迈进。这样一个方法更集中于研究将来可能发生什么，而不仅仅是作些简单的臆测。

为什么要从这么大的规模上来思考呢？一个人难道不应该把规划集中于世界情势的某一特殊方面，以便于更容易实现该计划吗？

我们生活在一个不断专业化的年代，而且这种趋势有足够的理由。人类不断地从每个研究领域中学得更多的东西；每当一个专业形成，它都倾向于分裂成一些子专业。这种过程不断发生，而且这也是必要的和值得做的。然而，专业化也越来越需要以统

合作为补充。理由是对于一个复杂非线性系统来说，我们不可能通过将它们分解为既定子系统或不同方面而完整地描述它们。如果那些彼此有着密切相互联系的子系统或不同方面被分开研究，即使是非常地小心谨慎，所得结果的总和也仍然不能构成一个有用的整体图景。从这一意义上说，“整体大于部分之和”这一古代格言蕴含着深奥的真理。

因而人们必须摒弃这种观点，即认为严肃工作仅限于将一门狭窄学科中一个定义明确的问题推翻，而将大胆的整体性思考放在鸡尾酒会上。在学术生活、官僚机构及其他一些地方，整体性工作并没有得到足够的重视。可一个机构的头头、一个总统、首相或首席执行官在作出决策时却要装出一付将情况的各个方面及其相互作用都考虑进去的样子。对于领导者来说，在向下层组织了解情况时，只接触有关专家，并且只是在作最后的直觉判断时才进行整体性思考，这难道明智吗？

圣菲研究所的科学家、学者以及其他思想家，他们都来自世界各地，而且差不多代表了所有学科。他们聚集在一起，研究复杂系统及复杂性怎样产生于简单的基本定律。这些人除用传统的方式来对系统各部分的行为进行研究之外，还敢于对整体作一个~~大致的考虑~~。或许，圣菲研究所能促进世界各地致力于世界情势特殊方面研究的机构，在通向一个更接近持续稳定发展世界的潜在途径方面，进行合作研究。上面所说的那些特殊方面通常必须包括政治、军事、外交、经济、社会、意识观念、人口统计及环境等问题。一个比较适当的行动已经以 2050 计划的形式开始实行，该计划在世界资源研究所、布鲁金斯研究所及圣菲研究所的领导之下，有世界各地的人们与机构参与其中。

那么，这里所说的持续（sustainable）一词是什么意思呢？在《镜中世界》（*Through the Looking Glass*）一书中，哈蒂·敦蒂（Humpty Dumpty）向爱丽丝解释，他如何在每个星期六晚上（19 世纪时期工作周的周末）为一些词汇的使用权支付费用，然后用那些词汇表达他所想要的东西。现在许多人必然也在为“持

续”一词花费薪水。例如，如果世界银行资助某个对环境有破坏作用的老式大型发展计划，那么那个计划就很可能被冠以“持续发展”的名称，以指望它能更加为人们所接受。

这使我想起蒙迪·皮同（Monty Python）的故事。一个人来到办公室为他的鱼申请准养证。在被告知没有鱼准养证这样的东西时，这人指出，他在询问有关猫准养证问题时得到的也是同样的回答，但后来他却有了一个。当他出示他的猫准养证时，他被告知，“那不是猫准养证。那是在一个狗准养证上将‘狗’字划去，再用铅笔将‘猫’字添上去的。”

如今许多人正忙于用铅笔加写“持续”一词。它的定义并不总是很清楚的，因此在这里给它指定一个意义应该说得过去。该词的文学意义显然不足以说明问题。地球上完全没有生命的状态可能持续稳定了数亿年时间，但这里的持续稳定并不是我们所指的。普遍流行的暴政可能延续了许多代，但我们指的也不是那个意思。假想一个非常拥挤与高度组织化，或许极端暴烈的世界，里面只有几种动物与植物生存着（它们与人类社会有着密切的联系），即使这些条件以某种方式持续下去，它们也与我们所说的持续稳定世界没有联系。很清楚，我们所追求的东西除了持续稳定以外，还含有不多的可取之处。值得注意的是，关于什么是人类所期盼的理想，比如联合国宣言中所体现的那些，如今达成了相当程度的理论一致性。

那么，当我们谈论持续性时，我们为我们的地球与人类设想着怎样一种未来呢？怎样将我们的理想与某种程度的现实主义调和起来呢？无疑，我们的意思并不是停滞不前，并不是指那些忍饥受饿与被压迫人们的生活没有希望得到改善。但我们也不希望随着人口增加，随着贫穷的人们试图提高其生活水准，以及富有的人们对环境施加的巨大影响，而日益滥用环境。而且，持续性并不单指环境与经济事务。

从消极的方面来讲，人类不仅要避免生物圈退化与生物及生态多样性的破坏，而且需要避免毁灭性的战争，普遍的暴行以及

极度贫困的继续普遍存在。关键的概念是人类生活质量与生物圈状态的改善，并非主要以牺牲将来为代价而取得。这种改善包括允许相当程度的人类文化多样性，以及让更多的生物和由它们组成的生态群落共享我们这个行星的一切。

有些人是技术上的乐观主义者，他们认为，为达到避免灾难性未来的目的，我们不必大大地改变我们的做法，并认为，我们不需要经过特别的努力，而只需通过不断发展的技术，即可实现近似的持续稳定性目标。而另有一些人则根本不相信什么持续稳定性目标。但是，即便是那些不接受持续稳定性目标的人，也仍然可以思考这样一个问题，即在未来 50 年到 100 年的时间里是否有办法实现这一目标，如果有，那些方法可能会是什么样的，由此而致的世界状况看起来又应是什么样的。讨论这一问题并不要求人们具有与提出那些问题的人相同的价值观。

历史学家很讨厌人们说“这是历史上一个特殊时期”，因为这一句话已被说了很多个时代了。然而，我们的时代确实在两个定义明确并彼此有着密切联系的方面很特殊。

首先，人类已经具备了通过巨大的环境效应来改变生物圈的技术能力。战争已经不是什么新鲜事，但它现在可达到的规模却是前所未有的。人人都知道，一次全面的热核战争能够彻底毁灭地球上大量的生命，生物与化学战争可导致的灾难就更不用说了。而且，由于人口增长及某些特定的经济活动，人类正改变着地球的气候，并正在消灭许多动植物物种。实际上，人类过去所产生的破坏比人们通常所认识到的更大。各种形形色色的人为森林破坏，以及随之而来的水土侵蚀与干化，已是存在了数千年的古老问题了，并早就被人们评论过，比如大普林尼（Pliny the Elder）^①。即便是一万年以前生活在北美的一些规模不大的人群，也可能促成过北美冰河时代大型动物的绝灭，比如巨象与巨树

① 大普林尼（23—79），古罗马作家，今仅存他的一部百科全书式著作《自然史》——译者注

獾、可怕的狼、剑齿虎，及一些骆驼与马的种别。（有这样一个理论，它将某些绝灭的原因至少部分地归咎于人们为了使用动物的肉与皮毛而习惯于将整群动物赶下悬崖绝壁。）然而，当今整个生物圈遭受破坏的可能性比以往任何时候都大得多。人类活动已经导致了众多的环境问题，包括气候的变化，海洋污染，淡水质量的降低，森林的破坏，土壤的侵蚀，等等，而且它们之间又具有密切的相互联系。许多环境破坏都是古老的问题，但它们现在的规模却是空前的，这听起来似乎有些矛盾。

第二，世界人口与自然资源减损的上升曲线，不可能永远都陡峭地上升；不久后它们必然将经过拐点（这时增长率开始下降）。对于人类与地球来说，21 世纪是很重要的一段时期（从十字路口的本义上说）。在过去的许多世纪里，总人口随时间的变化很精确地服从双曲线规律，根据这一曲线，它将在 2025 年左右达到无限大。在我们这一时代，世界人口显然应该偏离那一双曲线，而事实上它也已经开始发生这种变化了。但是，人口曲线是由于人类的远见与朝向一个更持续稳定世界所取得的进展而逐渐变平，还是由于传统战争、饥荒及瘟疫流行的结果，而使人口曲线发生不规则的上下波动呢？如果人口与资源减损曲线确实是逐渐地变平，那么，它们是以什么方式来实现这一点的呢？它带来的是一个能保证人类正当的生活质量（包括相当程度的自由），并允许大范围生物多样性继续存在的世界呢，还是一个资源缺乏，存在严重污染，其动植物也只剩下与人类易于共处的有限物种的悲惨世界呢？

针对军备竞赛其手段与规模的发展，有人可能会提出类似的问题。人们是允许大规模的、彻底毁灭性的战争爆发呢，还是他们使用智慧与远见来限制与引导竞争，平息冲突，以协作来平衡竞争呢？我们将学习、或也许已经学会用灾难性战争之外的方式来驾驭我们的分歧吗？对于源自政治蜕变而来的较小冲突，又怎么处理呢？

世界资源研究所（我为自己对其成立发挥过作用而感到骄

傲)首任所长古斯·斯佩斯(Gus Speth)指出,人类在未来几十年里所面临的挑战是要完成一系列彼此相关的转变。我打算将他提出的那些转变的概念稍加扩展,这样,除了他所强调的社会、经济、环境方面之外,将会有更多有关政治、军事与外交方面的事物也包括进来。在对这些概念加以修改后,本章剩下的内容将围绕一组粗略但很有用的转变观念来阐述。

人口统计转变

我们已经看到,在未来的几十年里,世界人口随时间变化的曲线必然发生历史性变化。许多权威人士估计,下一世纪里世界人口将停止增加,但总人口大约将达到现在人口(55亿左右)两倍的水平上。今天,高人口增长率(尤其是由于医药与公众健康状况的改善而出生率并未下降)仍然存在于世界的很多地方。在热带一些不太发达的地区,包括生态上或经济上最不能负担其人口的肯尼亚,尤其如此。而此时,发达国家中的人口通常达到了相当程度的稳定,但移民影响除外,后者在未来几十年中将成为一个主要的问题。

关于与大多数发达国家中净出生率下降的有关因素,学者们已经进行了大量的讨论。他们现在提出一些能帮助各热带地方实现类似下降的方法。这些方法包括改善妇女健康、文化、再教育的状况;增加她们参加工作的机会,以及其他一些提高妇女地位的措施;降低婴儿死亡率(当然,这一方法开始时可能会起相反的作用,但逐渐地它可以帮助阻止人们通过生育比他们实际想要的更多的孩子,来补偿可能发生的死亡现象);为老年人设立社会保险,等等。不过这对许多发展中国家来说还是一个遥远的目标。

安全保障与有效的避孕方法自然很重要,但大家庭传统观念的冲击同样也不可忽视。在世界有一些地方,平均每对夫妇(特别是平均每个男性)想要的孩子数目仍然较多。能为一个与两个

孩子的家庭提供什么奖励呢？怎样用文化上适当的方式劝说人们，在现代世界，小家庭更符合人们的共同利益，它可以使大家的健康、教育、经济及生活质量水平，比有很多孩子的大家庭要高呢？时尚的改变对人类事务有着如此大的重要性，那么，可以采取什么措施来使小家庭的观点流行起来呢？可悲的是，这些问题在很多地方仍然得不到重视，即便那些声称将帮助解决世界人口问题的组织也是如此。

如果人类人口真的正在通过一个拐点，并将在几十年内在全球大多数地方停止增加，那么，这一过程不仅是一个具有最重大意义的历史性过程，而且人口开始停止增加的时间与最终的总人口数，也可能同样具有重要意义。人口增长对环境质量影响的性质与大小和许多因素有关，比如土地保有模式，就值得各不同地区的人们去认真仔细地研究。不过，就整体而言，人口增加极有可能加剧环境的恶化，要么由于富裕的人们巨大的消耗率，要么是因为贫穷的人们以不惜牺牲未来的一切代价而进行的生存斗争。

如果我们只是等待赤贫人口经济条件的改善来导致净出生率的降低，而不试图在经济发展的同时采取措施来促进这种降低，那么对环境的影响可能会更加严重得多。每个人对环境总的影响在经济状况改善后可能要比改善前大很多，而且，在最终实现相对富裕时，总的人口数越少，人类及生物圈其他部分的生存条件就越好。

技 术 转 变

几十年前，我们中的一些人，特别是保罗·艾尔里希（Paul Ehrlich）和约翰·霍耳准恩（John Holdren），就指出这样一个很显而易见的事实，即假定在一个给定地理区域中，对环境的影响可以有效地分解为三个相乘的因子：人口，以约定方法衡量的人均财富，以及每个人每单位约定财富对环境的影响。其中最后一

个因子特别依赖于技术。只是由于有了技术革新，今日庞大的人口才能够得以生存。尽管上十亿的人们还处于极度贫困状态，但由于科学与技术包括医药的进步，另外相当数量的人们已经设法过上了合乎情理的舒适生活。环境破坏已经非常严重，但如果人类不采取某种有远见的措施，那么未来可能出现的破坏将更加可怕。

如果利用得当，技术能够促使第三个因子小到根据给定的自然定律可达到的值。对非常贫穷的人们来说，财富因子可以被提高多少，在很大程度上取决于第一个因子即人口数的减少量。

在许多地方已经开始出现技术转变迹象，但它还有待于进一步发展。然而，即便是表面看来十分简单的技术困境，也仍然可能因陷入极其复杂的困窘而告终。

我们以人类根除疟疾的例子来说明这一点。就在不远的过去，排干沼泽仍然是消灭疟疾的主要方法。但现在人们已经懂得，应该尽可能避免破坏湿地。同时，科学已经发现导致疟疾的疟原虫以及携带这种细菌的蚊子。通过喷洒化学杀虫剂 DDT 来消灭这些蚊子，似乎是向前迈出了一步，但结果却导致了严重的环境影响。首先，处于水生食物链上层的鸟类产生了大剂量代谢产物 DDE，这种物质使许多种动物的卵壳变薄，并导致繁殖失败。这些动物包括美国的国鸟白头鹰。20 年前，DDT 在发达国家中就已被淘汰，受到危害的鸟群已开始恢复。但其他有些地方虽然已开始出现具有耐药性的带菌蚊群，却仍在使用它。

后来又发现，DDT 被淘汰后紧接着使用的一些替代品对人类有很大的危害性。不过现在已经可以利用比那些高级得多的方法来杀灭带菌蚊群，包括使用专门针对它们的化学药物，与释放不孕性蚊群，及其他一些“生物—环境控制”（bio—envirmental controls）。这样的方法可以在被称为“综合害虫管理”法中得到协调。迄今为止，如果大规模部署的话，这些方法所需费用还是挺昂贵的。将来也许能够发展更便宜且同样易控制的技术。当然，除虫剂仍然可以使用，但它们同样很昂贵，并且会产生一些

新的问题。

同时，还有一种简单的方法，在很多地方都行之有效，那就是使用蚊帐，在早晨与傍晚蚊子比较猖獗的各半小时里呆在蚊帐中。但不幸的是，在很多热带国家，那段时间内农村贫穷的人们正忙于户外劳作而无法呆在蚊帐里。

将来某一天很可能会发展出抗疟疾疫苗，它们甚至可能完全消灭各种形式的疾病，但那时又会产生另一种难题：那些由于有疟疾流行的危险而得以保护下来的重要野生地区，容易被人们进行不明智的开发。

显然，我花费了太多的时间来分析这一表面上很简单的例子，为的是由此揭示它的一些复杂性。在技术向降低对环境影响方面转变时，随时随地都可能突然出现类似的复杂性，不管是工业生产、矿物开采、食物生产或能量生产都是如此。

像国防工业向民用生产转变一样，技术转变需要财政支持以及工人的再训练，因为一些就业机会将逐渐消失，而另一工种的就业机会将被开辟出来。应当建议政策制定者将这些不同类型的转变视作相关的挑战。因此，停止生产化学武器应当被认为与禁止砍伐美国西北部的太平洋成熟原始森林一样重要。而且，当社会试图减少对人类健康有害物品的消费时，不管是合法的，如烟草，还是非法的，如可卡因，也会存在同样的政策问题。

然而，从需要这一角度来讲，三种转变提出了各不相同的问题。在化学武器的情形中，主要的挑战是要说服政府不再订购这样的武器，探查并毁坏已有的库存品。在药品情形中，主要是愤怒与争执的问题。在技术向低环境影响型的转变中，问题在于发展与使用较易控制技术的动机是什么。这就将我们带到了经济转变的问题。

经 济 转 变

如果空气或水在经济事务中被视作免费物品，那么污染、竭

泽而渔，也就算不上是经济损失；相关的经济活动于是以牺牲环境与未来的方式来进行。几个世纪以来，权威人士试图通过禁令与罚款来应付这种问题，但那些处理方式常常达不到目的。现在，某些地方正尝试大规模运用规章制度的方式，并取得了一些成功。对政府来说，处理这些问题的最有效方法，还是或多或少索取恢复环境质量所需花的费用。这就是经济学家所称作的外在因素内部化（internalizing externalities）。通过罚款或其他惩罚方式，规章制度本身就是一种索费形式。但是，虽然内部化成本促使环境质量恢复，或首先就避免它的恶化，而规章制度通常还要求污染者以任何最便宜的方式采取一些特殊保护行动。工业中负责按规定采取措施的人是那些有关的工程师与会计员，不必用官僚进行微观管理。

从大部分依靠自然的资本（natural's capital）生活转向主要靠自然的收入（natural's income）为生的经济转变，其主要要素就是试图索取真实成本。虽然索取成本费只是略为胜过规章制度，但它比单纯的口头劝告却肯定要好得多。首先，它减少了模糊性。

假定你的职业是给对环境影响小的产品颁发绿色奖牌，那么你就会碰到一个问题。例如，某种特殊的清洁剂所含的磷酸盐可能低于另一种清洁剂，从而在保证降低湖泊中海藻污染（eutrophication，藻类植物增加）方面略胜一筹，但它可能需要耗费更多的能源，因为使用它洗涤时需要用热水。随着颁奖工作的继续进行，你还会发现更多这样的两难问题。如何权衡这样的两种考虑呢？如果至少作这样一个尝试，即向制造商索取费用以恢复由他们的清洁剂所导致的海藻污染，并且如果将洗涤所需能量之费用也清楚地标于包装上，那么消费者可以只凭总的费用来作决策，市场将体现出它们的价值。绿色奖牌就可能变得不必要了。

当然，索取真实成本的一个大难题在于如何对它们进行评估。我们在前面已经讨论到，经济学从未真正成功地处理过质量

和不可逆性这样的微妙问题，这些问题类似于自然科学中热力学第二定律所产生的问题。当然，这样的问题可以归于政治范围，并只被当作公众意见问题来处理，但从长期来看，科学肯定也能对此作出解答。现在，最简单的方法是评估补偿所破坏环境要花的费用。对于不可替代的环境破坏情形，有必要采取严格地强行禁止的形式，但在其他方面，质量的持续性则与负担恢复环境所需费用密切结合起来，而质量的定义将由科学与公众意见两者结合起来作出。

任何索取真实成本计划的一个关键性部分，是取消政府给与破坏性经济活动的补助金。要不是因为有补助金的话，那些经济活动一点也不经济。在由世界各地著名政治家组成的世界环境与发展委员会（布隆特兰委员会）的工作中，委员会秘书长，加拿大的吉姆·麦克尼尔（Jim MacNeill）指出，要想了解环境正在发生什么变化，你必须不仅仅看环境部所采取的行动，更要了解财政部与预算的政策。只有在那里才能找到破坏性经济活动补助金的根源，而且有时能将它们砍掉，即便存在很大的政治困难。

预算的讨论直接将我们引导到了这样一个问题，即国民经济会计程序中是否包括自然资本减损。通常它们并不包括这一点。如果一个热带国家总统与一家外国公司签订买卖合同，为了一个很低的价格与一笔贿赂金而将国家森林中的树木砍掉一大批，那么国民收支帐户上所显示价格只是国民收入的一部分，甚至贿赂金也同样只有一部分在收支帐上显示出来，如果它在家中被花掉而不是存入瑞士银行的话。但是森林的消失，以及它所带来的好处与潜在价值的丧失，作为相应的损失无法挽回。而且，不只是热带国家以相当便宜的价格出卖他们的森林物产，美国太平洋西北部，英属哥伦比亚以及阿拉斯加的温带雨林的命运，就是一个有力的证明。很显然，国民经济会计制度的改革是所有国家的一个重要问题。幸而，实行那一改革的努力在有些国家中已经开始起步了。我们的例子也表明，同重大的贪污腐化作斗争是实现经济转变的一个关键要素。

对于依靠自然资本生活现象关心程度的另一个晴雨表是贴现率 (discount rate)。我获悉, 世界银行在为有重大环境影响的计划提供经费时, 仍然使用每年 10% 的贴现率。如果这是真的, 那就意味着未来 30 年里一些重大自然资产的损失被打折了 20% 的折扣。下一代的自然遗产的价值只有现在给定值的 5%, 如果它真被估算过的话。

用这一方法使用的贴现率是对所谓的代间公平 (intergenerational equity) 的一种量度, 后者对持续质量的观念很重要。过分地折扣未来等于掠夺未来。如果以某种方式将贴现率的概念推广, 那么它也许能用来包括持续性所指的大部分意思。

社 会 转 变

一些经济学家极其重视代间公平与代内公平 (generational equity) 之间可能的平衡, 这也就是对将来之关心, 与对今天贫穷人们为了生存而需要利用一些自然资源的关注之间的平衡。虽然当今生物圈某些方面的恶化是由极度贫困的人们在谋生过程中所致使的, 但恶化的大部分原因应归咎于富裕的人们对资源的挥霍浪费。然而, 许多情况下, 环境恶化与一些大型计划联系在一起, 这些计划是打算用来帮助比如发展中国家农村贫困人口。但这些计划实行的结果, 如果不全部是那至少常常是相当低效与具有破坏性的。其实, 我们可以通过大量地方性的小型行动来有效地帮助那些人们, 比如以称作微型借贷 (microlending) 的形式进行。

在微型借贷情形中, 由一个专门的金融机构为地方企业家, 其中许多是妇女, 提供小型贷款, 以使他们开办小型企业, 从而使当地许多人能藉此找到谋生的机会。这些商业活动提供的职业对环境的破坏往往不那么严重, 并且既能促成代内公平, 又能促使代间公平。幸运的是, 支持持续型经济活动的微型借贷正越来越普遍。

如果生活质量在人与人之间非常地不平衡，如果众多的人们过着缺衣少食的生活或早早地因病夭折，而他们却看到其他数十亿的人们却过上了更舒服的生活，那就很难说生活质量最终会达到持续性目标。很显然，为实现持续性目标，向着代间公平的方向采取大规模行动是必要的。如为持续发展提供微型借贷的情形一样，代间公平与代内公平之间的协同性更多于对立性。对发展中国家农村贫困人口真正有帮助的政策与那些保护自然的政策之间的相容性，比通常所声称的要大得多。真正对城市贫困人口有益的政策，当然应该包括避免城市环境灾难的条款，也应该包括解决农村人口大规模向城市移民的问题（其中有些城市已经膨胀到难以管理的地步）。事实上，社会转变显然必须包括缓和上百万人口的大都市的一些最恶劣的问题。

如今，比以往更甚的是，没有哪个国家能在不考虑国际问题的情况下，处理好同时影响城市与农村经济活动的难题。全球经济的出现就是现代形势的一个主要特征，更积极地参与这一经济的愿望是影响世界各地政府与商业政策的主要力量。全球经济问题的突出性以及快速运输、全球通信与全球环境影响，都意味着更大程度的世界性合作对于处理整个人类所面临的一系列严重的连锁问题是必要的。这又将我引向机构或管理的转变。

机 构 转 变

地区性或全球性合作并不局限于环境问题，或只限于环境与经济事务。维持和平，即所谓的国际安全保障，至少也一样地重要。

对联合国来说，组织选举监督或赞助为中止内战而进行的谈判，已是例行公事。“维和”（peacekeeping）行动正在世界的许多地方进行。结果并不总是令人满意，但至少这一方法正逐渐制度化。

同时，国家间合作还以许多其他方式进行着，而且，国家的

作用势必被削弱，因为在我们的世界中，太多的重要问题逐渐地超出国界。在人类活动的许多领域中，国家间、甚至世界性（或近似世界性）的机构，不管是正式的还是非正式的，已经在很久之前就发挥起了作用。如今又有了更多这样的机构。通常，它们将竞争导向持续模式，并使之由敌对型转为协作型。一些机构比另一些更加有效，但总的来说它们都有一定的重要性。下面列出了几类不同的机构。比如，空中旅行系统；国际邮政联盟；广播频率协约；国际刑警委员会（Interpol）；候鸟协约；国际濒危物种贸易条约（CITES）；化学武器条约；国际理论与应用物理联合会；国际科学联合理事会（简称国际科联）；世界数学、天文学、人类学、精神病学等学科会议；世界作家组织——国际笔会（PEN）；金融机构如世界银行与国际货币基金；跨国公司，包括麦当劳公司与 IBM 公司；联合国机构，比如世界卫生组织（WHO），联合国环境规划署（UNEP），联合国开发计划署（UNDP），联合国人口活动基金（UNFPA），联合国儿童基金会（UNICEF）与联合国教育、科学和文化组织（UNESCO，简称联合国教科文组织）；以及红十字会，红新月会（土耳其的红十字会——译注）大卫王的红盾会（犹太人红十字会——译注）与红狮和红太阳会（伊朗红十字会）。而且，英语作为一门国际性语言其渐增的重要性也不容忽视。

人类已经逐渐开始在全球或高度国际化的基础上，一步一步地处理一些有关生物圈及其中的人类活动的控制问题。

并且，关于全球公地——那些未被认定属于谁，因而属于全人类的地方——问题的磋商正在取得进展。不通过合作而自私地利用那些地方的资源，只会导致对大家都不利的结果。最明显的公地例子就是海洋、太空与南极地区。

较发达与较不发达国家之间的协议可以遵循星球交易的模式，后者我们在前面讨论自然保护的时候就已经提到。不过，在这里它又显示出了更广泛的意义：富裕国家向贫穷国家提供援助时规定贫穷方履行这样一项义务，那就是采取措施推动广义的持

续性发展，因而避免增加核武器以及采取保护野生地区的行动也被包括进来。（温带国家通过为热带国家森林保护提供费用来抵偿他们在发电事业中排放二氧化碳所造成的环境污染，也是星球交易的一种形式。）

然而，消极排他主义——具有不同语言、宗教、民族、国家及其他差别的人们之中的激烈并常常是暴力式的竞争——在近几年里已经比以往更加突出，特别是当一些独裁政权强加于这些竞争之上的一些管制被解除之后。在地球的不同地方正发生着很多起民族或宗教暴力冲突。原教旨主义的不同分枝正逐渐发展起来。世界正在迈向联合的方向，而在这种联合之中又有一种走向崩溃的倾向。

我们已经提到，不管多么小的差异都可用来将人们划分成严格敌对的群体。比如，我们可以看看索马里所进行的残酷战争。是因为语言差别吗？不，他们都说索马里语。是宗教差别吗？不，几乎所有索马里人都是穆斯林。是由于伊斯兰教内部存在不同的教派吗？也不是。那么是宗族差别吗？有一点，但造成如此大骚乱的并不是它。随着法律秩序的崩溃，挑起与进行战争的主要原因是在敌对军阀们领导下的宗族下的小宗派（subclans）。

观念的转变

上述这些倾向将会导致什么结果呢？如果过度纵容早已过时的消极排他主义倾向，将会发生军备竞争、生育竞争以及为争夺资源而进行的竞争，这些竞争将使质量持续性难以或不可能实现。我们的观念似乎需要来一个戏剧性的转变，包括我们的思考方式、我们的图式以及我们的范式的改变。如果我们人类想要实现彼此之间关系的持续性发展的话，我们必需进行上述转变；如果我们还希望实现同生物圈其他部分之间持续的相互作用，那就更不用说了。

科学研究还没有弄清楚，人们对其他被认为不同的人们（以

及对其他生物)的态度,在多大程度上受很久以前在生物进化过程中出现的遗传、硬连线(hard-wired)的倾向所支配。或许在某种程度上,我们惯于组成彼此互不相容的集团并对环境施加不必要的破坏,具有生物学的起源。它们可能是在生物进化中获得的,也许从前十分适应于大自然,但在一个相互依赖、拥有毁灭性武器及破坏生物圈的能力大大增加的世界中,这种习性不再能适应了。生物进化太慢,跟不上这些变化。不过,我们知道,快得多的文化进化能够修正生物学倾向。

社会生物学家强调,像其他动物一样,我们人类继承了这样一种倾向,即保护我们自己以及我们的近亲,从而使得我们与近亲能够生存至生育并将我们的一些基因模式传递下去。但在人类中,那种增加相容适应性的本能被文化深深地改变。对于某人跳进河里去抢救另一个面临被鳄鱼吃掉的危险的人这样一种情景,一个社会生物学家可能会主张,当水中那个人是近亲时,这种“利他”行为发生的可能性更大。文化人类学家则可能指出,在许多部落中,某些亲戚,包括相当远的亲戚,是“本族”成员或父母、后代,他们在很多方面会被当作真正的近亲来对待。或许这样一个部落的成员,会愿意冒牺牲自己生命的危险像救他们真正的兄弟姐妹一样,去救他们的本族同胞。无论如何,社会生物学家现在同意,人类中的利他行为模式大大地受文化的影响。冒生命危险去搭救另一个人的某种特定的意愿,会很容易感染部落里的所有成员。

这样的行为也会发生在更高级的组织中。在国家规模上,它被称作爱国主义。随着人们聚集成越来越大的社团,“我们”的概念在范围上不断扩大。(不幸的是,由于压力的作用,可能会显现出社会结构的一些弱点,这些弱点致使社会重新分裂成较小的单元。比如,萨拉热窝附近所发生的就是这样一个过程,当地一位居民如此评论:“我们同那些人们和睦相处了40年,我们彼此通婚,但现在我们认识到他们并不完全是人。”)虽然有这样的挫折,但总的倾向仍然是朝向范围越来越广的团结。

最大的观念问题是，那种团结感是否能在较短的时间尺度上影响到整个人类，并在一定程度上影响到我们所属的生物圈与生态系统中的其他生物。能有越来越多的全球性长期考虑来补充地方性的短期考虑吗？家庭意识能经历非常快速的文化进化，从而发展到星球意识吗？

过去的政治联合常常是通过征服而实现的，有时继之而来的是试图压制文化多样性，因为文化多样性与民族竞争像一枚硬币的两面，相互对立。然而，为了满足持续质量的要求，向星球意识的进化必须包容文化多样性。人类需要多样性的统一，其中多样化传统经进化后能允许彼此之间的协作，并使许多具有连锁关系的、向持续型的转变能够实现。社团对人类活动来说是必要的，但只有具有合作动机的社团才有可能适应未来的世界。

同时，人类文化多样性导致了意识观念或范式、图式的多样性，它们具有地球人类思考方式之特征。其中一些世界观，包括关于什么是美好生活的特定观点，可能特别有助于持续质量目标的实现。这样的观念最好能变得更加普及，尽管文化多样性可能由于其他观念的衰败而得到更大破坏性的后果。通常，文化多样性的保护不仅能产生与正统观念相抵触的主张，而且还会导致与其他目标之间的冲突。

几年前，我去听了加州大学洛杉矶分校的一次演讲，主讲人是瓦克拉伏·哈威尔（Václav Havel），他当时是即将分裂的捷克斯洛伐克联邦共和国总统，现在则为捷克共和国的总统。他演讲的主题是最近几十年里他的国家所受到的环境损害，这些损害对人们的健康造成了严重的影响。他将环境损害归咎于人类中心主义（anthropocentrism），特别是其中这样一个观念，即我们人类拥有地球，并有足够的智慧去学会如何开发它。当然，哈威尔不仅是个政治家，也是作家与人权卫士。大多数普通的政治家是禁止攻击人类中心主义的，因为选民都是人。但是，对我们人类来说，认为自然自身具有实际价值，而不仅将它看成对自称为人这种特殊灵长类动物的有利用价值之物，可能是真正的明智之举。

信 息 转 变

在地方、国家及超国家层次上处理环境与人口问题、社会与经济问题、国际安全保障问题以及这些问题之间密切的相互关系，需要在知识与理解、以及知识与理解的传播中发生一种转变，我们可以称之为信息转变。这里，自然科学、技术、行为科学及法律、医药、教育、外交等各行各业都必须发挥作用，商业与政府部门当然也必须发挥作用。只有当名流与普遍百姓对人类所面临的复杂问题都有了更深程度的理解时，持续质量才有实现的希望。

仅将知识与理解专门化那还远远不够。当然，在当今时代，专业化也是必要的。但是，如我们前面所讨论到的，对专业化知识进行统合，使之形成一个合乎逻辑的整体，同样也非常必要。因此，社会必须比从前更加重视整体性研究。这种整体性研究旨在通过一种粗略的模仿或模拟，同时将一个综合性形势的各重要特征及其相互作用整合到一起，因而势必比较粗糙。早期一些试图对整体进行粗略描绘的尝试曾受到人们怀疑，部分地是因为那些结果过快地被发表，也因为过分地利用了这些结果。但这些不应该再成为妨碍人们再次尝试的理由，不过在发表那些难免是试验性与近似的结果时，态度应当谦逊，不要武断。

那些早期研究比如向罗马俱乐部呈递的第一份报告《增长的限度》(*Limits to Growth*)的一个额外缺点是，决定结果的许多关键性假设与变量并不随参数而发生变化，但读者却能看到结果随假设与数字的变化而变化。当今，由于有高效率计算机可以使用，我们能够更容易地研究随参数而变化的结果。可以检验，结果对不同假设的敏感性，因而研究结构可以变得更加透明。而且，部分研究可以采取博弈的形式，比如《西姆城》(*Sim City*)或《西姆地球》(*Sim Earth*)，这是韦尔·赖特(Will Wright)领导下的麦克斯公司开发出来的产品。博弈法允许批评家按他或她

自己的判断来修改那些假设，并看看会产生什么结果。

彼德·施瓦茨（Peter Schwartz）在他撰写的《放眼未来的艺术》（*The Art of the Long View*）一书中，叙述了荷兰皇家炮弹公司的规划小组几年前如何推断出，石油价格不久将会急剧下降，并建议公司采取相应的行动。董事们表示怀疑，他们中的一些人说他们并不会受规划小组推测的影响。施瓦茨说，于是这一分析便以博弈的形式提出来，并允许董事们去核查，比如说，允许他们合理改变他们所认为错误的输入量。根据他的记叙，最主要的结果总是一样的，因此，董事们信服了，开始为一个较低石油价格时期作准备。一些参与者对荷兰皇家炮弹公司所发生事情的回忆有些不同，但不论如何，这一故事很好地说明了建构模型时，增大透明性十分重要。随着模型中包含越来越多真实世界的特征，并相应地变得越来越复杂，因此，将它们透明化，告诉人们哪些是假设，以及可对它们进行怎样的改变，这一任务也就变得更加重要和更富于挑战性了。

我们之中那些参加了如 2050 计划的人面临许多棘手的问题。这些计划可以使下世纪中叶有一个更加持续的世界，可是，这些导向持续质量的转变如何在将来 50 到 100 年间实现呢？我们希望哪怕是粗略地理解各种转变之间的复杂相互作用，尤其是产生由它们引起的敏感的相对与绝对调节的问题，这一希望有可能实现吗？有希望充分考虑世界各地条件的广泛变化吗？还有比上述更重要的其他转变或其他看待整套转变问题的方式吗？这些问题牵涉到 21 世纪中叶左右的那段时期，那时各种转变可能都已部分地得到实现，或至少已经走上正轨。对那个时代进行有益的思考是很困难的，但未必不可能。比如易卜生所写的《海达·高布乐》（*Hedda Gabler*）一书中，当有人对艾勒·乐务博格（Eilert Løvborg）写的历史书在描述将来的篇章表示惊奇时，他说：“尽管如此，仍有一两件事必须被提到。”

至于更遥远的未来，在 21 世纪中叶之后，真正接近质量持续性的地球将具有什么样的优势条件呢？对那样一种情形我们有

什么设想呢？如果生活在那个时代，我们将会看到什么，听到什么以及感觉到什么呢？我们真应该设想一番，尤其是对一个质量增长超过数量增长的世界。我们应该想像这样一个听起来像是乌托邦式的世界，在那里，《世界状况报告》与《世界资源报告》并不一年比一年坏；在大多数地方，人口正稳定下来；极度贫困正逐渐消失，全人类更公平地分享财富；索取真实成本的真正尝试已作出；世界性及其他国家间机构（以及国家与地方机构）开始处理人类社会与生物圈其余部分的复杂连锁问题；偏向持续性与星球意识的观念赢得更多的拥护者，而各种各样的民族怨恨与基督教原旨主义作为离心因素而遭到淘汰，但仍然保持着大量的文化多样性。如果我们甚至不能想像一下这样一个世界会是什么样子，或在定量计算的基础上估计它可能如何运作，那么，我们一定不能指望实现可持续发展的目标。

在三种时间范围中，让人们对比较遥远未来的更持续世界进行构想，自然是极困难的，但十分重要的是，我们应该克服不愿对这样一个世界进行具体构想的习惯。只有如此，我们的想像才可能冲出某些习惯与态度之局限，而那些局限性现在正在导致或行将导致重重困难；也只有如此，我们才能找到改良的方法来处理我们彼此之间的关系，以及我们与生物圈其余部分之间的关系。

当试图构想一个持续的未来时，我们还必须考虑哪些技术的、心理学的或社会的意外之事，可能会使那个相当遥远的未来完全不同于我们如今可能构想的那样。需要有一个由富于想像的挑战者组成的特殊小组来不断提出这样的问题。

这个小组还可以考虑这样一个问题，即在一个当今许多最令人担忧的现象已被消除的世界中，会出现什么新的严重的问题。几年以前，许多权威人士并没有预言冷战时期不久即会被一个具有不同问题的新时期所取代，但即便是那些预言了这种变化的人，也没有认真考虑哪些问题将代替那些不再占主导地位的常见问题。

关于将来几十年的短期设想是怎么样呢？不久的将来，哪种政策与活动可能促成以后更接近持续质量的时代呢？开展关于最近之将来的讨论一点也不困难，而且对许多观察者来说，目前所面临的一些问题正变得明朗起来了。需从现代经验中学习的主要东西，或许是我们提到微型借贷的时候所言及的那些内容。这就是自下而上的主动精神比从上向下的更重要。如果当地人们深深地卷入到一个过程，如果他们帮助进行组织，并且如果他们感觉到其结果的利害关系，尤其是一种经济利害关系。那么，比起官吏或强有力的开发者强迫人们行动，这种自下而上的过程成功的可能性就要大得多。在帮助热带地区实现自然保护及至少部分经济持续发展目标时，保护主义者发现，投资到地方团体与地方领导阶层，特别是投资培训地方领导者，是最有价值的事情。

虽然可以很容易地说服人们讨论中等时限之将来——在那一时期，如果要想实现持续发展目标，必须先大体上完成那些有着相互连锁关系的转变——但这一挑战的惊人复杂性可能很令人气馁。所有这些转变都必须被考虑；每一转变的性质与时限都有待确定；它们在世界不同地方或许各不相同，并且彼此缠结在一起。然而，这种高度的复杂性可能会导致一种简单性。当然，在自然科学领域（它的确更易于分析，但仍然需要一些训练）中，在一个数学奇点附近的转变中，不妨假设是从气体到液体的转变，转变的性质确实只依赖于少数几个重要的参数。但那些参数通常不能预先描述出来；必须对整个问题进行仔细研究以后才会发现它们。极度复杂的非线性系统的行为通常也确实会显示出简单性，但这种简单性是典型生成型的，而非一开始就会显现出来。

关于通向一个更接近持续世界的可能途径的整体性政策研究，具有重要价值。但我们必须谨慎地将这些研究当作“想像的增补物”（prostheses for imagination），而且要防止夸大它们可能具有的正确性。试图将人类行为，尤其是社会问题，纳入到某种势必狭窄的严格数学框架中的努力，已给世界带来了许多痛苦。

例如人们就曾以那种方式来使用经济科学，结果当然是令人遗憾的。还有，人们常常不严格地根据科学，特别是科学之间的类似性，来论证一些有损人类自由或福利的意识观念。19世纪的一些政治哲学家所倡导的社会达尔文主义就是许多例子中的一个，但还绝不是最糟糕的一个。

然而，在适当的精神指导下，许多粗略的整体性政策研究（不仅包括线性计划，而且包括进化与高度非线性模拟及博弈），可以为人类集体远见功能的产生提供一些适度的帮助。一份早期的2050文件这样描述道：我们的情形有点像晚上在一个陌生地带驾驶一辆快速汽车，那个地带非常地崎岖，布满沟沟坎坎，不远处还有悬崖。要是有一种前灯，即便是很微弱并闪烁不定的一种，也能帮助我们避免一些最坏的灾难。

如果人类的确具有了相当程度的集体远见——对未来的分支历史有某种程度的了解——那么，一种高度适应性的变化必将发生，但这种变化还不是一个关口事件。然而，当朝向更大持续性的一组连锁转变完成时，这将是一个关口事件。尤其是意识观念的转变，这意味着人类意识向全球意识迈出了重大的一步；这种转变或许借助于巧妙驾驭的技术进步，不过现在还只能朦胧不清地预想这些技术。转变完成之后，整个人类作为一个整体——与栖息或生长在地球上的其他生物一道——将会成为比现在更好的一个复合的、具有充分多样性的复杂适应系统。

第二十三章 后 记

在这简短的一章里，我打算作一个不可缺少的常规性总结，但并不涉及全书中每一个论题，而只针对中心主题，即简单性、复杂性与复杂适应系统——这一将夸克、美洲豹与人类联系在一起的主题。

《夸克与美洲豹》不是专门论著，它是相当非学术性的，它涉及了大量不能充分或深入探讨的领域。而且，许多被详细描述了的工作大部分仍在继续研究之中，这意味着，即使用方程以及比现在所使用的更多的科学术语来全面论述，也仍然会留下大量重要的问题无法解决。显然，本书的主要目的是引起思考与讨论，起一种抛砖引玉的作用。

贯穿全书的是自然基本定律与偶然性之间相互作用的观点。支配基本粒子（包括夸克）的定律已开始显示出它们的简单性；主宰所有粒子与力的统一量子场论已经出现，那就是超弦理论。这一优美的理论建立在靴绊原理的基础上，它要求基本粒子能以一种自治的方式来彼此构成。自然的另一基本定律是宇宙在膨胀

开始时的简单初始条件。如果哈特尔与霍金的建议是正确的，那么这一初始条件就能用统一粒子理论表述出来，从而两个基本定律就变成一个。

偶然性之必然进入图景，是因为基本定律是量子力学的，而量子力学只能给出各种可能的宇宙之粗粒化历史的存在概率。粗粒化方式必须使得概率具有确定的定义。它也允许对自然进行一种近似经典的、决定论的描述，这种描述常常是稍稍地偏离经典规律，偶尔也有较大的偏离。这些偏离，特别是较大的那种，导致历史进行分支，不同分支各有其存在概率。事实上，所有可能的粗粒化历史构成一个分支树或“有许多岔路的花园”，这被称为“半经典范围”。因而量子力学的不确定性远远超出了著名的海森堡不确定原理的范围。而且，那种不确定性能在非线性系统中通过混沌现象而被放大，这意味着一个过程的结果对初始条件有一种无法确定的敏感性，如气象学中常常发生的那样。我们人类所看到的周围世界相当于一个半经典领域的世界，但由于我们的感觉能力与仪器水平的有限性，我们仅被局限在那个领域的一种粗糙得多的形式之中。既然有这么多东西隐藏在我们背后，偶然性成分自然更增加了。

在历史的某个特定分支，以及在特定的时候与宇宙中特定的地方，那些条件有利于复杂适应系统的进化。那些系统（如图3—1所示的那样）接收信息——以数据流的形式——并找到那一数据流中的表观规律性，而将其余部分当作随机成分处理。那些规律性被压缩成一个图式，这一图式被用来描述世界，在一定程度上预言世界的未来，并规范复杂适应系统自身的行为。图式可能会经历许多变更，从而产生许多彼此竞争的形式。它们在那种竞争中会有怎样的结局，依赖于选择压力，这就是来自真实世界的反馈情形。那些压力可能反映描述和预言的正确性，或反映规范在什么程度上使系统得以生存。但是，选择压力与“成功”结果之间的这种关系不是严格的关联，而只是一些倾向而已。而且，对压力所作出的反应可能也并不完美，因而，图式的适应过

程只能近似导向系统的“适应”结果。“不适应”图式同样也能发生。

有时不适应只是表面上的，之所以如此，是由于在定义何谓适应时忽略了某些重要的选择压力。在其他情形下，真正不适应性的出现是因为适应过程太慢，跟不上选择压力的变化。

复杂适应系统在有序与无序之间的一个中间状态运作得最好。它们探寻由半经典领域中近似决定论所决定的规律性，同时从不确定性（可描述为噪声、涨落、热、不定性，等等）中获益，这种不确定性在寻找“更好”图式的过程中能提供很大的帮助。适应性的概念能将“更好”一词具体化，但它常常难以被正确地决定下来。这时，将精力集中于起作用的选择压力可能更加有益。有时，一种适应性之所以具有确定的定义，是因为它来源于外部的“外在因素”，比如，设计程序使计算机寻求诸如国际象棋游戏的战胜策略情形就是如此。当适应性是“内生的”，产生于一种不可预测的（即缺少外部成功准则）进化过程时，这种适应性通常就很难于明确定义。然而，如果只是作为一个隐喻，适应性景观的思想仍然是很有用的。如果适应性变量对应于高度（我随意地设定高度越低对应于适应性越大），假设代表图式的所有变量在一水平线或水平面上呈现出来，那么，寻找更适合的图式就相当于在一条波状线或一个二维平面上寻找很低的地方，如图 16—2 所示。如果没有适当数量的噪声〔或服从塞斯·洛埃德（Seth Lloyd）称作的金凤花原理（Goldilocks principle）所要求的热量——不太热，不太凉，而是刚好〕的话，那种搜寻极有可能被阻滞在一个比较浅的洼穴中。噪声或热能使系统摆脱一个浅坑，并使它得以发现附近一个更深的坑。

图 2—1 已表示出地球上的各种复杂适应系统。从那个图上我们可以看出，一个复杂适应系统倾向于产生出其他这样的系统。因而，地球上所有与生物有某种联系的系统都经历了这样一种演变：最先是生命史前时期导致生物产生的化学反应，经过生物进化与人类的文化进化，到装备有适当硬件或软件的计算机，

乃至科学小说中所描述的未来可能的发展，比如通过将人脑用金属丝缠在一起而组成的复合人。

当一个复杂适应系统描述另一个系统（或其自身）时，它要建构一个图式，即从所有数据中提炼出表观规律性，并用简要的形式将它们表述出来。这样一个对系统规律性的简要描述（比如由一个人类观察者作出的）的长度，是我所称作的系统的有效复杂性。它相当于我们通常所理解的复杂性的含义，不管是科学惯例还是日常谈话。有效复杂性不是系统所固有的，而是依赖于粗粒化的程度及观察系统所使用的语言与编码方式。

有效复杂性，不管是不是内部的，本身并不能充分地描述一个适应或不适应复杂系统的潜在性质。一个系统可能比较简单，但却能够在某个给定时间内，以很高的概率进化出远比它复杂的事物来。比如，现代人类最初出现的情形就是如此。人类并不比他们的近亲大猩猩复杂得多，但因为他们能够发展具有极大复杂性的文化，因而具有大量我所称作的潜在复杂性。同样，在宇宙历史的早期，当存在某种导致星系形成的涨落时，那些涨落的潜在复杂性也是相当大的。

应该将一个系统或一个数据流的有效复杂性与其算法信息量（AIC）区分开来，后者与整个系统或数据流的简要描述的长度有关，不仅包括它的规律性，还包括它的随机特征。当 AIC 很小或接近于最大值时，有效复杂性趋近于零。只有当 AIC 为中等大小的时候，有效复杂性才可能具有很大的值。因此，重要的行为同样也是有序与无序之间的那种中间状态。

一个复杂适应系统通过观察输入数据流各部分的某些共同特征，从而发现其中的规律性。各部分之间的相似性以所谓的互信息来测度。世界的规律性来源于简单基本定律与偶然性作用的结合，后者能导致被冻结的偶然事件。这些偶然事件导致某种特定结果，虽然它们本来也可以其他不同的形式出现，并产生出多样性来。所有这些由先前一个偶然事件引起的结果，其共同起源可以在一个数据流中产生大量互信息。我引用这样一个例子，即亨

利三世在他哥哥死后继承英国王位，使大量有关亨利国王的参考文献在硬币、文书与书本上出现。所有这些规律性均来自于一个被冻结的偶然事件。

许多偶然事件，比如大量分子水平上的涨落，并没有被放大以至于具有重大的影响，而且它们也没有导致许多规律性。这些事件可能成为到达复杂适应系统的数据流中的随机部分。

随着时间的推移，越来越多被冻结的偶然事件同基本定律一同发挥作用，并产生出规律性。因此，随着时间的推移，越来越高级的适应系统趋向于通过自组织的作用产生，即便如星系、恒星和行星那样的非适应系统也是如此。但并非所有事物的复杂性都不断增加，更确切地说，是最大复杂性呈现出增加的趋势。对复杂适应系统来说，有利于复杂性的选择压力大大地加强了这一趋势。

热力学第二定律告诉我们，封闭系统的熵（无序性的量度）有增加或者保持不变的趋势。例如，如果一个高温物体与一个低温物体相接触（但它们与宇宙其余部分物体没有什么相互作用），那么热量倾向于从高温物体流向低温物体，从而减弱联合系统中温度有序的隔离。

只有在对自然粗粒化，即重视有关封闭系统的某些信息，而忽视其余信息或干脆忽略时，熵才是一个有用的概念。总的信息量保持不变，而且，如果最初它主要集中于重要信息，那么其中一部分信息将倾向于流入未被计入的不重要信息之中。这种情况发生时，熵就倾向于增加。

自然界的一种基本粗粒化是由历史提供的，它构成一个半经典领域。对于一个复杂适应系统所观察到的宇宙来说，有效的粗粒化可以非常地粗糙，因为系统只能接收到极小一部分有关宇宙的信息。

随着时间的推移，宇宙像钟表发条一样越来越松弛，宇宙的一些彼此多少相互独立的部分也倾向于越来越松弛。各种时间之箭都永远指向未来，不仅对应于熵增加的箭头是如此，而且那些

对应于因果关联、向外的辐射流、对过去而非将来的记录（包括记忆）形成等的箭头也是如此。

一些反对生物进化论的教条主义者试图证明，越来越复杂生命形式的出现违背了热力学第二定律。它跟银河规模的复杂结构之产生一样，当然并不违背热力学第二定律。而且，在生物进化中，我们可以看到，随着生物越来越适应其周围环境，一种“信息”熵不断增加，因而使信息上的差异缩小。这里的信息差异很容易使人联想到高温物体与低温物体之间的温度差别。事实上，复杂适应系统都显示出这种现象——真实世界给系统施加选择压力，图式倾向于根据那些压力来调节它们所容纳的信息。进化、适应以及复杂适应系统所进行的学习，都是宇宙膨胀式发展的一些方面。

我们可以问：进化系统是否能与周围环境达到平衡，像高温物体与低温物体达到相同温度那样。有时它们确实能达到平衡。如果设计程序使计算机演化出游戏策略，那么，它可能会找到最理想的策略，于是搜寻即告结束。如果游戏是一种儿童玩的三连棋（tic-tac-toe），那情形就无疑正是如此。如果游戏是棋类，计算机可能也会在将来某一天发现最好的策略，但那一策略迄今为止仍未发现，而计算机继续在一个抽象的巨大策略空间寻求最好的对策。这种情况非常地普遍。

我们可能会看到少数这样的情形，即，在生物进化过程中，适应问题似乎在生命历史的早期就已经得到了最终解决，至少在表型层次上如此。生活在海洋深处地壳板块交界处的高温、酸性、含硫环境中的圆齿蛇卷螺，很可能至少在新陈代谢方面非常类似于 35 亿多年前生活在那种环境中的生物。但是，其他许多生物进化问题一点也不像三连游戏，事实上甚至也不像棋类游戏，后两者毫无疑问可在将来某一天成为已解决的问题。首先，选择压力根本就不是恒定不变的，在生物圈的许多部分，物理化学环境不断发生着变化；而且，在自然群落中，各种不同物种一起构成其他物种的环境的一部分，这些生物共同进化，可能达不

到任何真正的平衡。

在不同的时间与地点，系统似乎的确会达成暂时的近似平衡，对整个群落来说尤其如此，但不久之后，那些平衡即被“打断”，有时是由物理化学环境变化所致，有时则是长期“漂变”之后的少数突变所致。这里的长期漂变是指这样一系列基因变化，它们只对表型有细微的影响，对生物生存没有大的影响。漂变可为很微小的基因型改变作准备，而那些基因型改变将导致重大表型变化。

这种比较适度的基因型变化时常会导致关口事件，导致一些全新的生物种类产生。单细胞真核生物的出现就是例子之一。称它为真核生物是因为它的细胞拥有一个真正的核，还有其他细胞器，如叶绿体或线粒体等，它们被认为是由原来独立的生物被合并入细胞后形成的。另一个例子是由单细胞生物发展成多细胞动物与植物，它们大抵是通过一种胶状物质以集聚的方式来实现的，这种胶状物质是由于一种生物化学的突破而产生出来的一种新物质，它能将细胞连结起来。

当一个复杂适应系统不管是以集聚还是其他方式，产生出一种新的复杂适应系统时，这一过程就可以认为是一个关口事件。常见的例子是哺乳动物免疫系统的进化，其运作有点像生物进化自身，只是时间标度小得多，入侵者能在数小时或数天内被识辨出来并被消灭，而进化出新生物物种则需要数十万年时间。

生物进化的许多显著特征也能在其他诸如人类思想、社会进化及适应性计算之类的复杂适应系统中发现，而且它们具有非常相似的形式。所有这些系统都在不断探究新的可能性，开辟新的行为方式，发现关口事件，并不时地产生新型复杂适应系统。恰如生物进化过程中不断出现新的小生态环境一样，经济中也不断发现新的谋生方式，科学活动中则不断发明新的理论，等等。

多个复杂适应系统集聚成一个复合复杂适应系统，是开辟更高级组织的有效方式。此后，复合系统的组成成员，通过建构图式来解释与对付彼此的行为。经济就是一个很好的例子，生态群

落也是如此。

关于这种复合系统，科学家们正在进行广泛的研究。他们提出了一些理论，并将这些理论与不同领域的经验进行比较。大部分研究表明，这种复合系统倾向于进入有序与无序之间的一个有明确定义的过渡区，在那里，它们能够有效地适应环境，并按幂定律分配资源。那一区域有时被比喻为“混沌边缘”（edge of chaos）。

没有迹象表明太阳系里行星系统的形成或包括地球那样的行星有什么特别之处。也没有证据表明，导致地球生命起源的化学反应在任何别的行星不可能发生。因此，有可能在散布于宇宙之中的无数行星上，都存在着复杂适应系统，并且，其中至少有一些复杂适应系统与地球生物进化及其产生的生命形式有许多共同特征。然而，关于生命的生物化学是唯一或近乎唯一的，还是只是大量可能结果中的一种，仍然是个有争议的问题。换句话说，它是主要决定于物理，还是在很大程度上归因于历史，还没有定论。

地球上近 40 亿年的生物进化，通过试误的方法，提炼出大量关于生物不同生活方式的信息，这些生物都生活在生物圈中，彼此相关。同样，经过 5 万多年的时间，现代人揭示了非同一般的大量信息，这些信息显示了人类在彼此之间及与自然界其余部分相互作用中生活的方式。不管是生物多样性还是文化多样性，现在均受到严重的威胁，努力保护这两种多样性是一个重要而紧迫的任务。

文化多样性的保护与其他目标之间呈现出大量的矛盾与冲突。其中一个挑战是使多样性与全世界人们联合起来的迫切需要协调起来。现在人们面临许多全球的问题，但这种协调是非常困难的。另一个挑战是由许多教区文化对普遍化的、科学的、非宗教的文化所表现出来的敌意所引起的，后者熏陶出了许多保护文化多样性最有力的倡导者。

迫切需要进行自然保护，保护尽可能多的生物多样性，但除

非将它置于更广阔的环境问题背景中来考虑，否则这种目标最终是不可能实现的。而这些环境问题也必须与人类所面临的人口、技术、经济、社会、政治、军事、外交、机构、信息以及观念问题放到一起考虑。尤其是所有这些领域中的挑战，可以认为是需要在 21 世纪完成的一系列通向更持续发展的连锁转变。如果能实现的话，更大的持续性将意味着全球及大多数地区人口停止增加；实行鼓励索取真实成本、质量提高甚于数量增加、靠自然的收入而非其资本为生的经济政策；具有对环境影响较小的技术；更加公平分配的财富，尤其是极度贫困现象不再普遍存在；有更加强大的世界性与国际机构来处理紧急的全球性问题；公众更加了解未来多种彼此相互牵连的挑战；还有，也许是最重要与最困难的是普遍赞赏多样性的联合——各种不同文化传统和国家合作与无暴力竞争，以及与我们人类共享生物圈的其他生物持续共存。这样一种情形似乎是乌托邦式的，也许不可能实现，但值得我们去建构未来的模型——不是作为蓝图，而是作为想象的辅助手段——并看是否能设想出可导向 21 世纪后期这样一个理想的持续发展世界的途径，在这样一个世界中，整个人类与自然的其余部分，将比现在在更大得多的程度上发挥复杂适应系统的作用。

译 后 记

M. 盖尔曼教授 (1929—) 是世界著名的物理学家。1929 年他出生于美国的纽约, 1948 年毕业于耶鲁大学, 1951 年获麻省理工学院哲学博士学位。他先后在普林斯顿大学、芝加哥大学工作过, 1955 年起在加州理工学院任教, 1956 年晋升为教授, 年仅 27 岁。此后一直在加州大学任教, 直到退休。

1961 年, 盖尔曼根据他提出的理论预言有两个新粒子存在, 3 年后这两个粒子被实验发现了, 这使盖尔曼声誉大振。接着, 为了对日益增多的“基本”粒子进行分类, 并进一步深入了解基本粒子的性质, 盖尔曼破天荒地假定存在一些带有分数电荷的粒子, 他称它们为“夸克”(quark), 并认为夸克共有 6 种。

1969 年, 盖尔曼“因为关于基本粒子的分类及其相

相互作用方面的贡献和发现”，荣获该年度诺贝尔物理学奖。1977年，除了顶夸克（top quark）外，其他5种夸克均先后被实验证实；又过了18年，到1995年（本书英文版出版后的一年），顶夸克也终于被人们用实验证实。

盖尔曼退休后，对宇宙间万事万物（包括人类和社会）的复杂性与简单性的关系有浓厚的兴趣，并作了深入的研究。研究的成果之一，就是写作并出版了这本《夸克与美洲豹》。

我是1996年春才知道这本书的。我哥哥杨建军从美国纽约回武汉探亲，送给我4本书，其中一本就是《夸克与美洲豹》。我一看见这本书就十分惊奇：夸克和美洲豹风马牛不相干，怎么被盖尔曼拉到一起来了？这种好奇使我决定把这本“奇”书翻译出来，幸运的是李永平先生恐怕也有与我相同的好奇心，立即支持我翻译这本书，并以最高的速度谈妥了版权。这真是我们译者和中国读者的幸运！

盖尔曼在前言中清楚地说明本书的写作目的。他说：

“研究已经表明物理学、生物学、行为科学，甚至艺术和人类学，都可以用一种新的途径把它们联系在一起。有些事实和想法初看起来彼此风马牛不相关，但新的方法却很容易使它们发生关联。”

是一种什么样的“途径”和“方法”呢？说起来话长，最好请读者自己去看、去思考、去下结论，我在这儿实在用不着赘述。我只指出两点：

一是这本书在美国出版后受到好评。普洛特金博士

(Dr. Mark J. Plotkin, 《一个巫师学徒的故事》的作者)说:“这是一本与作者一样十分有趣的书。他把那些看起来似乎完全不相关的东西,如黑猩猩的行为、雪崩力学、超弦理论以及莎士比亚等等,都编织到一个迷人的故事当中。真是神奇极了!”著名学者萨根(Carl Sagan,《布鲁卡的脑》的作者)说:“能够在这本书中看到第一流的学者与最大的秘密较量,而且坚决反对神秘主义,真是令人十分振奋。”所以,读者可以相信,这本书值得您认真一读。

二是这本书涉及面之广,令我惊讶,其中涉及宇宙学、基本粒子物理学、量子场论、生物学、经济学、语言学、社会学、人类学、考古学、文学艺术等等,而且讨论也比较深入。因此,看这本书恐怕不能很消闲地去看,得伏桌认真地看才能看懂,才能大有收获。当然,您也不必担心看不懂。盖尔曼在前言中保证他的书一定能为广大读者看懂。诚哉斯言!

最后,在本书出版之际,除了应该感谢湖南科学技术出版社和感谢我哥哥杨建军把这本书的原版送给我以外,我还应该感谢华中理工大学物理系的张端明教授和吴颖教授,本书在翻译过程中得到了他们许多有益的帮助和建议;我还理所当然地要感谢李湘莲和周雁翎两位同志,如果不是他们两位鼎力相助,这本书至少现在还不会在读者手中。李湘莲翻译了第一篇和第四篇的全部以及第三篇的第十六章;周雁翎翻译了第三篇的十七、十八两章;其余的是我翻译的。全书审校、统稿、索引等,均由我完成。

这本书涉及面太广,很不容易翻译,我们在译的时

候真是如鲁迅先生在译《死魂灵》时所说的那样：“字典不离手，冷汗不离身。”尽管我们冷汗出了不少，恐怕错误之处仍会不少，我们诚请读者和专家们不吝指正。

杨建邺

1997年1月21日于武汉
华中理工大学宁泊书斋

索引

A

Action, 作用,

h as unit of, h 作为~的单位, 203

Action at a distant, 超距作用, 86, 171

Adams, James L., 亚当斯, J. L.

Conceptual Blockbusters, 《概念大拍卖》, 265

Adams, Robert McC (Bob), 亚当斯, R. McC (Bob)., 295

Adaptive schemata, 适应图式, 287-301

Algorithmic complexity, 算法的复杂性, 35, 49, 217

Algorithmic information content, 算法信息量, 49, 101-102, 103, 115

entropy and, 熵和~, 217-218

information vs., 信息与~的比较, 37

as measure of randomness, ~作为无序性的量度, 41

of universe, 宇宙的~, 133

- Algorithmic randomness, 算法的随机性, 35, 41, 48-49
- al-Khowarizmi, Muhammad ibn Musa, 阿尔-花拉子模, 35, 236
- Alternative histories, 可供选择的历史
 in quantum mechanics, 量子力学中的~, 142-143
 of universe, 宇宙的~, 138, 140-141, 159, 161, 206
- Altruistic behavior, 利他行为, 245-246, 355
- Alvarez, Luis, 阿尔瓦雷兹, L., 281
- Anderson, Carl, 安德森, C., 176, 188
- Anderson, Philip, 安德森, P., 190
- Anderson-Higgs mechanism, 安德森-希格斯机制, 191-192, 193, 199
- Annihilation, 湮灭, 124
- "Anthropic principle", 人择原理, 208-209
- Antixclusion principle, 反不相容原理, 124, 174
- Antifamily, 反粒子家族, 187-189
- Antiquark, 反夸克, 181, 183
- Arrows of time, 时间之箭, 210-226
 and biological evolution, ~和生物学进化, 232
 entropy and second law, 熵和(热力学)第二定律, 212-213, 215, 221
 and initial condition of universe, ~和宇宙的初始条件, 129-130, 192, 221
- Arthur, W. Brian, 亚瑟, W. B., 248, 317
- Artificial selection, 人工选择, 296
- Asimov, Issac, 阿西莫夫, I., 19
- Aspen Institute seminars, 埃斯彭研究所讨论班, 95, 258, 299
- Axelrod, Robert, 艾克色诺德, R., 308

B

- Baby universe, 婴儿宇宙, 207
- Bak, Per, 贝克, P., 97
- Ball lightning (kugelblitz), 球状闪电, 281
- Beebe, Spencer, 比伯, S., 330
- Bell, John, (Bell's inequalities), 贝尔, J., (贝尔不等式), 169-170

- Bennett, Charles, 贝纳特, C., 103, 172, 173, 217
- Bertlmann's socks, 伯特曼的袜子, 170
- Big bang, 大爆炸, 148, 210
- Biogeography, 生物地理学, 327-328
- Biological evolution, 生物进化, 17, 19, 115, 215, 222, 225
as complex adaptive system, ~作为复杂适应系统, 61, 69, 229, 239
cultural evolution vs, 文化进化与~, 301
- Biology, 生物学
of brain, 脑的~, 116
reduction of, ~的还原, 113-114, 115
- Bit, 比特 (信息的单位), 35
- Bit string, 比特串, 35-38, 47, 49, 56-59
- Blackett, Patrick, 布莱克特, P., 176
- Black holes, 黑洞, 215, 225
- Bohm, David, 玻姆, D.
and Einstein, ~和爱因斯坦, 168
EPRB experiment, EPRB 实验, 169
- Bohr, Niels, 玻尔, N., 164, 166
- Bootstrap principle, 靴袪原理, 127-128, 204
- Borges, Jorge Luis, 玻格斯, J. L., 149
- Bosons, 玻色子, 124, 174
higgson (Higgs boson), 希格斯子 (希格斯玻色子), 190-192
- Bottom quarks, 底夸克, 188
- Brain and mind, 脑和意识, 116-117
- Brillouin, Léon, 布里渊, L., 217
- Brookings Institute, 布鲁金斯研究所, 341
- Brout, Robert, 布劳特, R., 190
- Brown, Jerram, 布朗, J., 245
- Brown, Robert, 布朗, R., 152
- Brownian movement, 布朗运动, 152
- Brueckner, Keith, 布吕克勒, K., 44
- Brun, Todd, 布隆, T., 27
- Brundtland Commission, 布隆特兰委员会, 350

C

- Calandra, Alexander, 卡兰得拉, A. 265
- “The Barameter Story”, 气压计的故事, 265-267
- CERN accelerators, 欧洲原子核委员会的加速器, 125, 185, 190, 200
- Chaitin, Gregory, 蔡廷, G., 36, 39, 41, 102, 217
- Chance process, 或然过程, 见 Randomness
- Chaos, 混沌, 143, 164
- classical, 经典~, 25-26
- fractals, power laws, and, 分形, 幂定律, 和~, 96
- and indeterminacy, ~和不确定, 25-27
- Charmed quarks, 粲夸克, 188
- Chomsky, Noam, 乔姆斯基, N., 52, 290
- Coarse-grained histories, 粗粒化历史, 144-145
- of universe, 宇宙的~, 159, 162, 207
- Coarse graining, 粗粒化, 29-30, 34, 153
- entropy and, 熵和~, 220
- Color charge, 色荷, 182
- Color force, 色力, 182-183
- Colors of quarks, 夸克的颜色, 178
- Committee for Scientific Investigation of Claims of the Paranormal,
超自然现象科学调查委员会, 275-276, 285
- Competition, 竞争, 301
- of schemata, 图式的~, 24, 86, 325
- Completeness, 完备性, 166-167, 169
- Complex adaptive systems, 复杂适应系统, 11, 17-22
- and biological evolution, ~和生物进化, 17, 19, 61, 229, 239
- computer as, 计算机作为~, 72, 301-305
- economies as, 经济作为~, 316
- and mythology, ~和神话, 272
- Complexity, 复杂性, 28-35, 49, 68-69, 217, 220-224
- Computational complexity, 计算的复杂性, 28, 101

- Comte, Auguste, 孔特, A., 108
Conduitt, 康杜伊特, 84-85
Cooperation, 合作
 need for, ~ 的需要, 300
 of schemata, 图式的~, 236-237
Cosmological arrow of time, 宇宙的时间之箭, 221
CPT, 电荷, 宇称, 时间, 192
Creative thinking, 创造性思想, 255-267
Crick, Francis, 克里克, F., 66
Crutchfield, James, 克鲁奇菲尔德, J., 56
Crypticity, 隐蔽性, 101, 105
Cultural DNA, 文化 DNA, 288, 292, 335, 339
Cultural evolution, 文化进化, 288, 300, 325
Cybernetics, 控制论, 71

D

- Darwin, Charles, 达尔文, C., 118, 289
 Origin of Species, 《物种起源》, 296
Dawkins, Richard, 道金斯, R., 288
 The Blind Watchmaker, 《瞎眼的钟表工人》, 313
DeBono Edward, 狄玻洛, E., 261-262
Decision tree, 决策树, 72
Decoherence, 脱散, 146-149, 151
Decoherence coarse-grained histories, 脱散的粗粒化历史, 146-147
Delbrück, Max, 德尔布吕克, M., 118
Deming, W, Edwards, 德明, W. E., 294
Depth, 深度, 100-105
Deterministic chaos, 决定论混沌, 46-47
Digital organisms, 数字结构, 310
Dirac, Paul Adrien Maurice, 狄拉克, P. A. M., 109, 138, 176
DNA, 脱氧核糖核酸, 66, 69
Drug resistance in bacteria, 细菌的耐药性, 62-73

Durrell, Gerald, 云勒尔, G., 299

E

ECHO, 312

Ecological communities, 生态群落, 231-232, 250, 301

Economics, 经济学, 314-321, 349-351

Einstein, Albert, 爱因斯坦, A., 39, 99

dream of unified field theory, 统一场论的梦, 126-127

explanation of Brownian movement, 布朗运动的解释, 152

mass-energy relation, 质能关系, 190

rejection of quantum mechanics, 反对量子力学, 127, 166-167

Eldredge, Niles, 艾尔德里奇, N., 232

Electron, 电子, 174-176

and electron neutrino, ν 和电子中微子, 183-186

flavor of, ν 的味, 183

Electron neutrino, 电子中微子, 183, 185

Elementary particle physics, 基本粒子物理学, 9, 112

Emergent structure, 自生结构, 99-100

Emmons Louise, 艾孟斯, L., 331

Empirical theory——Zipf's law, 经验理论——季普夫定律, 92-97

Englert, Francois, 恩格勒特, F., 190

Entropy, 熵, 100

and coarse graining, ν 和粗粒化, 220

of algorithmic complexity, 算法复杂性的 ν , 221

decrease of, ν 的减少, 216

increase of, ν 的增加, 216-218

as measure of disorder, ν 作为无序性的量度, 213, 214

and information, ν 和信息, 214, 217-218

and second law, ν 和(热力学第二定律), 212-213, 214, 216-217, 220, 320

EPRB experiment, EPRB 实验, 169

and hidden variable alternative, ν 和隐变量, 169-170

- Equivalence principle, 等效原理, 86
Erwin, Terry, 爱尔温, T., 29
Everett, Hugh, III, 艾弗雷特第三, H., 137-138, 150
Expansion of universe, 宇宙的膨胀, 140, 148, 149, 153, 192, 202, 215
Expert system, 专家系统, 72
Extremophiles, 圆齿蛇卷螺, 230-232, 242

F

- Families of fermions, 费米子家族, 187-189
Faraday, Michael, 法拉第, M., 80, 82
Fermi, Enrico, 费米, E., 148
Fermions, 费米子, 174, 200, 256
 defined, $\sim$ 的定义, 124
Feynman, Richard, 费曼, R., 138, 176, 185, 204
Feynman diagram, 费曼图, 186
Fields, 场, 124, 127
Fierz, Markus, 菲尔茨, M., 282
Fine-grained histories of universe, 宇宙的精粒历史, 143-144, 145
First law of thermodynamics, 热力学第一定律, 212-213, 320
Fisher, Sir Ronald, 费希尔, R., 76
Fish falls, 落鱼, 282-283
Fitness, 适应性, 305-306, 313
Fitness, biological concept of, 适应性的生物学概念, 241-249, 291, 313
Fitness landscape, 适应景观, 242-243
Fitness of sex, 性别的适应性, 246-249
Fitzpatrick, John, 费兹帕特瑞克, J., 245
Flavor forces, 味力, 186
Flavors of quarks, 夸克的味, 178
Fluctuations, 涨落, 151-152, 157
Fontana, Walter, 冯塔纳, W., 310
Foster, Robin, 福斯特, R., 331
Fowler, William, 福勒, W., 184

- Fractals, 分形, 96
Franklin, Benjamin, 富兰克林, B., 174
Franklin, Rosalind, 富兰克林, R., 66
Free will, 自由意志, 156-158
Friedman, Jerome, 弗里德曼, J., 182
Frost, Robert, 弗罗斯特, R., 149
Frozen accidents. 冻结的偶然事件, 133-134, 222-225, 291

G

- Gateway events, 关口事件, 234-235, 240, 253-254
Gauge theories, 规范理论, 189
Gell-mann, Authur (father), 盖尔曼, A., 15-16, 87, 336-337
Gell-mann, Ben (brother), 盖尔曼, B., 12, 13-15
General-relativistic gravitational theory, 广义相对论的引力理论, 17, 84-87, 126-127, 204, 315
Genome, 基因组, 64, 233-235, 245, 296
Genotype, 基因型, 64, 67-68, 246
Gentry, Alwyn, 根特瑞, A., 331
GeV (Giga-electron-volt), 吉电子伏, 190
Gilbert, William, 吉尔伯特, W., 80
Glashow, Sheldon, 格拉肖, S., 186, 189
Gluinos, 胶微子, 201
Gluons, 胶子, 179-182
 flavor-blind, 味盲, 179
 sensitive to color, 对色的敏感, 179-182
“Goblin worlds”, 小妖精世界, 164
Gödel, Kurt, 哥德尔, K., 39
Goldbach's conjecture, 哥德巴赫猜想, 40, 101-102
Goldberger, Marvin, 戈德伯格, M., 20, 188
Gould, Stephen Jay, 古尔德, S. J., 232
Grand unified theory, 大统一理论, 126, 202
Gravitational constant, 引力常数, 197-198

- Gravitino, 引力微子, 200
 Graviton, 引力子, 124, 128, 200
 Green, Michael, 格林, M., 128
 Greenberg, Joseph, 格林伯格, J., 290
 Griffiths, Robert, 格里菲斯, R., 138, 140
 Grossman, Marcel, 格罗斯曼, M., 204
 Gutenberg, Beno, 古腾伯格, B., 99

H

- $\hbar$ ($\hbar/2\pi$), 197-198, 203
 Haldane, J. B. S., 霍尔丹, J. B. S., 76
 Half-life, 半衰期, 131
 Hamilton, William, 哈密顿, W., 248
 Hartle, James, 哈特尔, J., 137-138, 163
 on initial state of universe, 论宇宙的初始条件, 131, 140, 202, 205, 212
 The Wave Function of the Universe, 宇宙的波函数, 137
 Havel Václav, 哈威尔, V., 356
 Hawking, Stephen, 霍金, S., 131, 152, 210, 221
 Heisenberg, Werner, 海森堡, W., 197
 Heisenberg uncertainty principle, 海森堡不确定原理, 25, 139, 143, 162, 175
 Helmholtz, Hermann von, 亥姆霍兹, H., 258
 Henderson, Hazel, 亨德森, H., 288
 Heterotic superstring theory, 杂化超弦理论, 127-129, 192, 195, 199
 Hidden variable, quantum mechanics and, 隐变量, 量子力学和~, 167-170
 Higgs Peter, 希格斯, P., 190
 Higgs (higgs boson), 希格斯子 (希格斯-玻色子), 190-191, 193, 201
 Hinshelwood, Sir Cyril, 欣谢尔伍德, C., 70
 Holland, John, 霍兰德, J., 305, 307, 312, 317
 Hopfield, John, 霍普菲尔德, J., 304
 Horowitz, Mardi, 霍洛威兹, M., 297

Hufstедler, Shirley, 霍夫斯特德勒, S., 22

Hunt, Morton, 亨特, M.

The Universe Within, 《宇宙之内》, 259

I

IGUS (information gathering and utilizing system), 信息的搜集和利用系统, 155-156, 164, 208

Immune system, 免疫系统, 20-21

Indeterminacy, 不确定性, 139, 270

from quantum mechanics and chaos, 量子力学和混沌引起的~, 25-27

Information. See also Algorithmic information content, 信息

cost of, ~成本, 320

and entropy, ~和熵, 214, 217-218

Information theory, 信息理论, 34, 36-37

Initial condition of universe, 宇宙的初始条件, 137, 140, 202, 205, 221

and arrow (s) of time, ~和时间之箭, 129-131, 192, 210, 215, 221

role of, ~的作用, 209

Irreversibility, 不可逆性, 219, 320, 350

Ishi (last Yahi), 艾希, 335

Isotopic spin, 同位旋, 256-257

J

Johst, Hanns, 约斯特, H., 153

Joos, Erich, 朱斯, E., 138, 149

Joyce, James, 乔伊斯, J.

Finnegans Wake, 《芬尼根彻夜祭》, 177

Judson, Olivia, 贾德森, O., 248

K

Kapitsa, Pyotr L., 卡皮查, P., 281

- Kendall, Henry, 肯德尔, H., 182
Kibble, Thomas, 吉坡, T., 190
Kolmogorov, Andrei, 柯尔莫哥洛夫, A., 36, 217
Kroeber, Alfred, 克鲁耶伯, A., 335
Kugelblitz (ball lightning), 球形闪电, 281
Kuhn, Thomas, *The Structure of Scientific Revolution*, 库恩, T. 《科学革命的结构》, 85-86, 135

L

- Landauer, Rolf, 兰道尔, R., 217
Langton, Christopher, 兰顿, C., 295
Language acquisition, 语言的获得, 290-291, 299
 by a child, 小孩的~, 50-61
Language evolution, 语言进化, 14, 150, 290-291, 292
Laser, 激光, 124
Learning, 学习, 255-267
Least action principle, 最小作用原理, 205
Lederberg, Joshua, 莱德伯格, J., 65
Lee, T. D., 李政道, 185
Lewis, Harold, 刘易斯, H., 281-282
Life, 生命
 distinguishing features of, ~的最突出的特点, 62-63
Limits to Growth (Club of Rome), 《生长的极限》(罗马俱乐部), 357
Lorenz, Edward N., 洛伦兹, E. N., 26
Lorenz, Konard, 洛伦兹, K.
 King Solomon's Ring, 《所罗门王的环》, 297

M

- MacCready, Paul, 麦克里迪, P., 264
Machines that learn, 能学习的机器, 302-321

- MacNeill, Jim, 麦克尼尔, J., 350
- Macrostates, 宏观态, 213-214
- Magical thinking, 神秘的思想, 268
- Maladaptive schemata, 不适应图式, 287-301
- Maloney, Russell, 马洛尼, R.
Inflexible Logic, 《不变的逻辑》, 48
- Mandelbrot, Benoit, 曼德布罗, B.
The Fractal Geometry of Nature, 《自然界的分形几何》, 前言 9, 96
- Many world, 多世界, 138, 150
- Marcum, Jess, 马库姆, J., 44
- Mathematics, 数学
continuum, 连续统, 315
discrete, 离散, 316
- Matter-antimatter symmetry, 物质-反物质对称, 192-193
- Maxwell, James Clerk, 麦克斯韦, J. C., 80, 83, 216
- Maxwell's demon, 麦克斯韦妖, 216-217
- Maxwell's equation, 麦克斯韦方程, 81-82, 126-127, 315
- Mayr, Ernst, 梅伊尔, E., 13, 283
- Mendel, Gregor, 孟德尔, G., 296
- Microstate, 微观态, 213-214
- Mixed, quantum state, 混合量子态, 140
- Monte Carlo method, 蒙特卡罗法, 44-45
- Morgan, T. H., 摩尔根, T. H., 118
- Morowitz, Harold, 莫洛惠兹, H., 209, 234-235
- Multiple universe, 多宇宙, 206-207
- Munn, Charles A. 芒恩, C. A., 252-253
- Muon, μ 子, 188
- Muon neutrino, μ 子中微子, 188
- Mutation of gene, 基因的突变, 67-68, 253-254, 296
- Mutual information, 交互信息, 57

N

- Nature selection, 自然选择, 64

- Neddermeyer, Seth, 尼德迈耶, S., 188
Neutrino, 中微子, 183-189
Neutrino astronomy, 中微子天文学, 211
Neutron, 中子, 178, 182
 discovery of, ~的发现, 177
Neveu, André, 勒伏依欧, A., 128
Newton, Issac, 牛顿, I., 84-86, 136, 151, 197-198
Nobel, Alfred, 诺贝尔, A., 107
Nobel prize, 诺贝尔奖, 107, 176, 182, 185, 191
No-boundary boundary condition, 无边界的边界条件, 131
Nuclear force, 核力, 182-183
Nuclear particle states, 核粒子状态, 183

O

- Omnès, Roland, 欧姆内斯, R., 138, 140
Oppenheimer, Robert, 奥本海默, R., 281
Optimization, 最优化, 307, 311
Origin of life on earth, 地球上生命的起源, 208, 215, 234, 310
Oersted Hans Christian, 奥斯特, H. C., 80

P

- Palmer, Richard, 巴尔末, R., 317
Paradigm, shift, 范式改变, 85-86
Parallel processing computers, 并行处理计算机, 32, 36, 302
Parameter, 参量, 95
Pareto, Vilfredo, 巴瑞脱, V., 314
Parker, Theodore A., 帕克, A., 330-331
Parthenogenesis, 单性生殖, 246, 248
Particle-antiparticle symmetry, 粒子-反粒子对称, 176
Pattern recognition, 认知模式, 88, 271, 292

- Pauli exclusion principle, 泡利不相容原理, 124, 174
- Perkins, David, 伯金斯, D., 263
- Peterson, Ivars 彼德逊, I.
 Newton's Clock, 《牛顿的钟》, 25
- Phenomenological theory, 唯象理论, 92
- Phenotype, 表型, 64, 68, 233, 245
- Photino, 光微子, 200
- Photons, 光子, 124, 174-177
 virtual exchange of, $\sim$ 的虚交换, 175-176, 179, 196
- Planck, Max, 普朗克, M., 166
- Planck mass, 普朗克质量, 195, 196, 198, 199, 201-202
- Planck's constant, 普朗克常数, 197-198
- Plasticity, 可塑性, 297-298
- Plotkin, Mark J., 普洛特金, M. J. 335
 Tales of a Shaman's Apprentice, 《一个巫师学徒的故事》, 336
- Podolsky, B., 玻多尔斯基, B., 166, 169
- Poincaré, Henri, 彭加勒, H., 259
 Science and Method, 《科学与方法》, 25-26
- Popper, Karl, 波普尔, K., 77
- Positron, 正电子, 124
 discovery of, $\sim$ 的发现, 176
- Potential complexity, 潜在的复杂性, 69
- Power laws, 幂定律, 93-98
 application to sand piles, 沙堆的应用, 97, 99, 313
 connection to fractals, 与分形的联系, 96
 in economics, 经济学中的 $\sim$, 314
- Probabilities, 概率, 140-142
 in quantum mechanics, 量子力学中的 $\sim$, 25, 131, 135, 140, 144
- Protons, 质子, 177-179, 182
- Pseudorandomness, 伪随机性, 45-47, 73
- Psychoanalysis, 精神分析, 77-78
- Psychological arrow of time, 心理学的时间之箭, 221
- Psychological, 心理学, 116-117

Punctuated equilibrium, 中断平衡, 232 234, 253, 309

Q

QCD. See Quantum chromodynamics, 见量子色动力学

QED. See Quantum electrodynamics, 见量子电动力学

Quantum (quanta), 量子, 124

Quantum accidents, 量子偶然事件, 133 134

Quantum chromodynamics, 量子色动力学, 180-182, 187, 189

Quantum computer, 量子计算机, 100

Quantum cosmology, 量子宇宙学, 139, 206-208

Quantum cryptography, 量子密码, 172-173

Quantum electrodynamics, 量子电动力学, 109-112, 174-177

Quantum field theory, 量子场论

particle-antiparticle symmetry, 粒子-反粒子对称, 176-177

of quarks and gluons, 夸克和胶子的~, 180

Quantum flavor dynamics, 量子味动力学, 186, 188, 189, 191, 193

spin of quantum in, ~中粒子的自旋, 193

Quantum mechanics, 量子力学

and classical approximation, ~和经典近似, 25, 135-164

collapse of wave function, 波函数的坍塌, 156

discovery of, ~的发现, 123

indeterminacy from, ~中的不确定性, 25-27

modern interpretation, ~的现代诠释, 6, 137-139, 164

Quantum states, 量子态, 124, 211

of universe, 宇宙的~, 139-141

Quantum universe, 量子宇宙, 25

simplicity and randomness, ~中的简单性和随机性, 123-134

Quark-gluon interaction, 夸克-胶子的相互作用, 182-183

Quarks, 夸克

bottom, 底~, 188

charmed, 粲~, 188

colors of, ~的色, 178

flavors of, ~的味, 178
force between, ~间的力, 179
prediction of, ~的预言, 11
strange, 奇异~, 188
top, 顶~, 188

R

Radioactive decay, 辐射衰变, 133, 136, 152-154
Ramond, Pierre, 雷蒙德, P., 128
RAND Corporation, 兰德公司, 41-46
Randi, James, 兰迪, J., 285
Randomness, 随机性, 43-49, 224
 AIC as measure of, AIC 作为~的量度, 41
 meanings of random, 随机的意义, 43-44, 47
 Shakespeare and proverbial monkeys, 莎士比亚和著名的猴子, 48-49
Random process, 随机过程, 47
Random string, 随机串, 38, 41, 104
Ray, Thomas, 雷, T., 309-313
Reductionism, 还原主义, 116, 118-119
Regularities, 规律性
 in data stream, 数据流中的~, 23, 54-57, 105, 270
 and effective complexity, ~和有效复杂性, 55, 162
 from frozen accidents, 冻结偶然事件中的~, 133-134
Renormalizability, 可重整性, 196, 201
Richardson, L. F., 理查森, L. F., 63
Richter, Charles, 里克特, C., 99
Rising exponential, 上升的指数, 132
Robots, 机器人, 71-73
Rosen, Harold, 罗森, H., 128
Rosen, N., 罗森, N., 166, 169
Rosenberg, C. R., 罗森伯格, C. R., 303
Rubbia, Carlo, 鲁比亚, C., 185

S

- Sakharov, Andrei, 萨哈洛夫, A., 193
- Sakiestewa. Ramona, 萨吉斯特娃, R., 11
- Salam, Abdus, 萨拉姆, A., 108, 186
- Santa Fe Institute, 圣菲研究所, 47, 237, 291, 305
- Scale independence, 标度不变性, 97
- Scaling laws, 标度定律, 93-95, 98
- Schema (schemata), 图式
- in adaptive process, 在适应过程中的~, 17-18
 - competition of schemata, ~的竞争, 24, 86, 323
 - cooperation of schemata, ~的合作, 236-237
 - theories as schemata, 理论作为~, 74
- Scherk, Joel, 谢尔克, J., 128
- Schrödinger equation, 薛定谔方程, 314
- Schrödinger's cat, 薛定谔猫, 152-153
- Schultes, Richard E., 舒尔特施, R. E., 335
- Schumaker, John F., 舒马克, J. F.
- Wings of Illusion*, 《幻想的翅膀》, 275
- Schwartz, Peter, 施瓦茨, P.
- The Arts of The Long View*, 《放眼未来的艺术》, 358
- Schwarz, John, 施瓦兹, J., 128
- Scientific enterprice, 科学活动, 74-87
- Search for Extraterrestrial Intelligence (SETI), 寻找地球外的智慧, 208, 251
- Second law of thermodynamics, 热力学第二定律
- application of, ~的应用, 214-216
 - biological evolution and, 生物进化和~, 229-230
 - entropy and, 熵和~, 212-214, 216-217, 320
 - irreversibility and, 不可逆性和~, 319, 350
- Sejnowski, Terrence, 赛伊洛夫斯基, T., 303
- Selection in biological evolution, 生物进化中的选择, 229-254

- Selection pressure, 选择压力, 294, 300
- Selectron, 超电子, 201
- Selfish gene, 利己基因, 244, 293
- Selfish scheme, 利己图式, 271, 292
- Self-organized criticality, 自组织临界态, 97-100, 314
- SETI, See Search for Extraterrestrial Intelligence
- Sexual reproduction, 有性生殖, 246-248
- Shannon, Claude, 香农, C., 37, 217
- Simon, Herbert, 西蒙, H., 60
- Simplicity, 简单性
- defined of, $\sim$ 的定义, 27-28
 - in quantum universe, 量子宇宙中的 $\sim$, 123-134
 - of universe, 宇宙的 $\sim$, 83, 86-87
- Sims, Karl, 西姆斯, K. 295-296, 313
- Skeptics movement, 怀疑运动, 275
- Smith, John Maynard, 史密斯, J. M., 248
- Social Darwinism, 社会达尔文主义, 361
- Sociobiology, 社会生物学, 355
- Solomonoff, Ray, 索洛莫洛夫, R. 36, 217
- Solvay Conference, 索尔维会议, 166
- Southwick, Marcia (本书作者的妻子), 索斯威克, M., 84
- Speciation, 物种形成, 12
- co-evolving species, 共同进化, 231-232
 - definition of species, 物种的定义, 13
 - diversity of species, 物种的多样性, 17, 326
- Speed of light, 光速, 82, 197-198, 211
- Sperry, Roger, 斯佩里, R., 117
- Speth, J. Gustave, 斯佩斯, J. G., 345
- Spin angular momentum, 自旋角动量, 75, 169, 193
- Spontaneous symmetry breaking, 自发对称破缺, 191-193, 223
- Squarks, 超夸克, 201
- Standard model, 标准模型, 174-194
- Anderson-Higgs mechanism, 安德森-希格斯机制, 191-192

- and violation of time symmetry, $\sim$ 和时间对称违背, 192
- zero-mass approximation, 零质量近似, 189-191
- Starobinsky, A. A., 斯达洛宾斯基, A. A., 164
- Strange particles, 奇异粒子, 256-257
- Strange quarks, 奇异夸克, 188, 258
- Strong interaction, 强相互作用, 183, 256-257
- Summing over, 加遍, 146-148, 151, 158
- Superconducting supercollider (SSC), 超导超碰撞体, 125, 200
- Supergap, 超隙, 200
- Supernova, 超新星, 215
- Superstandard model, 超标准模型, 201
- Superstition, 迷信, 269
 - from fear, 恐惧产生 $\sim$, 270-271, 278, 292
 - from invented regularities, 虚构的规律性产生 $\sim$, 270-271, 278
 - and skepticism, $\sim$ 和怀疑论, 269-286
- Superstring theory, 超弦理论, 127-129, 195-207
- Sustainable world, 可持续的世界, 340-361
- Swift, Jonathan, 斯威夫特, J. 63
- Sympathetic magic, 交感巫术, 89, 270, 336
- Sze, Arthur, 斯策, A., 11
- Szilard, Leo, 西拉德, L., 20, 217

T

- Tauon, τ f, 188
- Tauon neutrino, τ 子中微子, 188
- Taylor, Richard, 泰勒, R., 182
- Thermonuclear reaction, 热核反应, 113
- TIERRA, 309-313, 316
- Time symmetry, 时间对称性
 - violation of, $\sim$ 的违背, 192
- Top quarks, 顶夸克, 188
- Tree of branching histories, 分支历史之树, 149-150, 206, 223

Trivers, Robert, 特里弗斯, R., 244

U

Ulam, Stanislaw, 乌拉姆, S., 198

Uncertainty principle, 不确定原理, 139, 143, 162, 175

Unified quantum field theory, 统一量子场论, 127, 194

Universal constants of nature, 普适的自然常数, 197

Universal laws of physics, 普适的物理学定律, 9, 11

Updike, John, 厄普代克, J., 183

“Cosmic Gall”, 宇宙的烦恼, 183-184

V

van der Meer, Simon, 范德米尔, S., 185

Virtual exchange of photons, 光子的虚交换, 175-176, 179, 196

Visvcaino, Sebastian, 维斯凯罗, S., 91

Volta, Alessandro, 伏打, A., 80

W

Wage distribution, 工资分布, 313

law of, $\sim$ 的定律, 313

Wallas, Graham, 沃纳斯, G., 259

Watson, James, 沃森, J., 66

Weak force, 弱力, 256-257

neutral, 中性 $\sim$, 186

reaction resulting from, $\sim$ 引起的作用, 185

Weinberg, Steven, 温伯格, S., 186

Weisskopf, Victor, 韦斯科普夫, V., 71

Wells, H. G., 韦尔斯, H. G., 14

Wheeler, John A., 惠勒, J. A., 137

- Wiener, Norbert, 维纳, N., 71
Wiesenfeld, Kurt, 维森菲尔德, K., 97
Wilkins, Maurice, 威尔金斯, M., 66
Winos, W 微子, 201
Woolfenden, Glen, 伍尔芬登, G., 245
World Commission on Enviroment and Development, 世界环境和发展委员会, 350
World Resources Institute, 世界资源研究所, 341, 344
Wright, Sewall, 赖特, S., 76
Wright, Will, 赖特, W., 357

Y

- Yang, C. N., 杨振宁, 185
Yang-Mills theories, 杨-米尔斯理论, 189

Z

- Zeh, Dieter, 蔡赫, D., 138, 149
Zel'dovich, Ya. B., 泽尔多维奇, Ya. B., 193
Zipf, George Kingsley, 季普夫, G. K., 93-95
Zipf's law, 季普夫定律, 92-98
Zurek, Wojciech ("Wojtek"), 朱里克, W., 138, 149
Zwiebach, Barton, 茨威巴赫, B., 204